



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA

**“ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE SATURACIÓN EN
INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS SELECCIONADAS DE
LA CIUDAD DE MÉXICO”**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

JOSE MATIAS LLANES AYALA

DIRECTOR DE TESIS:

M. EN I. FRANCISCO JAVIER GRANADOS VILLAFUERTE



MÉXICO, D.F., MAYO 2014



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/23/2014

Señor
JOSE MATIAS LLANES AYALA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. FRANCISCO JAVIER GRANADOS VILLAFUERTE que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted conforme a la opción I. "Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional", para obtener su título en INGENIERIA CIVIL

**"ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE SATURACIÓN EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS
SELECCIONADAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO"**

INTRODUCCIÓN

- I. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS DE CAPACIDAD VIAL**
 - II. PRINCIPIOS SOBRE EL FLUJO DEL TRÁNSITO**
 - III. SEMÁFOROS**
 - IV. INTERSECCIONES**
 - V. ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS**
 - VI. FLUJO DE SATURACIÓN Y MÉTODOS PARA DETERMINARLO**
 - VII. METODOLOGÍA UTILIZADA EN CAMPO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS NECESARIOS PARA DETERMINAR EL FLUJO DE SATURACIÓN BASE**
 - VIII. ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE SATURACIÓN EN INTERSECCIONES SELECCIONADAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO**
 - IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 26 de Mayo de 2014
EL PRESIDENTE DEL COMITÉ

M. EN I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	9
HIPÓTESIS	10
OBJETIVO.....	10
ANTECEDENTES.....	10
CONTENIDO DE LA TESIS	11
1. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS DE CAPACIDAD VIAL	14
1.1 Capacidad.....	14
1.2 Niveles de servicio	14
1.3 Factores que afectan la capacidad de servicio.....	15
1.3.1 Condiciones base.....	15
1.3.2 Condiciones del camino	16
1.3.3 Condiciones del tránsito	16
1.3.4 Condiciones de control.....	17
2. PRINCIPIOS SOBRE EL FLUJO DEL TRÁNSITO	19
2.1 Tipos de flujo del tránsito.....	19
2.2 Características del flujo del tránsito	19
2.2.1 Velocidad	19
2.2.2 Volumen y Tasa de flujo	22
2.2.3 Variación del volumen de tránsito en la hora de máxima demanda (factor hora pico)	22
2.2.4 Densidad.....	23
3. SEMÁFOROS	25
3.1 Clasificación de los semáforos	25
3.1.1 Semáforos de tiempo fijo	26
3.1.2 Semáforos no accionados por el tránsito	27
3.1.3 Semáforos accionados por el tránsito.....	27
3.2 Términos básicos.....	27
3.2.1 Altura de semáforos	28
3.3 Cálculo de los tiempos del semáforo.....	30
3.3.1 Intervalo de cambio de fase.....	31
3.3.2 Longitud del ciclo.....	32
3.3.3 Vehículos equivalentes.....	32
3.3.4 Flujo de saturación y tiempo perdido	33
3.3.5 Asignación de fase verde.....	35

3.4	Objetivos de la sincronización de los semáforos.....	35
3.5	Clasificación de los dispositivos de control	36
4.	INTERSECCIONES	39
4.1	Definición de intersección.....	39
4.2	Clasificación de intersecciones	39
4.2.1	Intersecciones a desnivel	39
4.2.2	Intersecciones a nivel	41
4.2.3	Intersecciones tipo T	42
4.2.4	Intersecciones de cuatro vías o tréboles	43
4.2.5	Intersecciones de vías múltiples	44
4.3	Canalización de intersecciones.....	44
4.4	Tipología de intersecciones	44
4.4.1	Intersecciones de tres ramales	45
4.4.2	Intersecciones de cuatro ramales	46
4.5	Puntos de conflicto en las intersecciones	48
4.6	Ventajas e inconvenientes de intersecciones.....	48
4.7	Criterios de proyecto	49
5.	ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS	52
5.1	Introducción al Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000).....	53
5.2	Capacidad en intersecciones con semáforos	55
5.3	Niveles de servicio en intersecciones con semáforos.....	57
5.4	Metodología de análisis operacional de intersecciones con semáforos (HCM 2000).....	57
5.4.1	Parámetros de entrada	59
5.4.2	Agrupación de carriles	61
5.4.3	Determinación de la tasa de flujo	62
5.4.4	Determinación de la tasa de flujo de saturación	62
5.4.5	Determinación de la capacidad y la relación volumen a capacidad	64
5.4.6	Determinación de las demoras	65
5.4.7	Determinación del nivel de servicio.....	68
5.5	Valores por omisión recomendados por el HCM 2000	68
6.	FLUJO DE SATURACIÓN Y MÉTODOS PARA DETERMINARLO.....	71
6.1	Tiempo perdido de puesta en marcha e intervalo de saturación.....	71
6.2	Flujo de saturación	72

6.3	Flujo de saturación base	73
6.4	Metodología para obtener el flujo de saturación seguido por el HCM 2000	73
6.5	Metodología del HCM para la recopilación de datos de campo para obtener el flujo de saturación	76
6.6	Técnicas de medición del flujo de saturación	79
6.7	Otras metodologías existentes para determinar el flujo de saturación	79
6.7.1	Método del Laboratorio de estudios de carreteras.....	79
6.7.2	Método del registro	80
6.7.3	Método de la grabadora de casete operado con baterías	80
6.7.4	Método de la fotografía en intervalos de tiempo.....	81
6.7.5	Método de la videgrabadora	81
6.7.6	Uso de Laboratorio de tránsito móvil.....	81
6.7.7	Métodos de Sistemas de Información Geográfica.....	82
6.8	Flujos de saturación obtenidos en distintos países	82
7. METODOLOGÍA UTILIZADA EN CAMPO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS NECESARIOS PARA DETERMINAR EL FLUJO DE SATURACIÓN BASE.....		85
8. ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE SATURACIÓN EN INTERSECCIONES SELECCIONADAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO		92
8.1	Descripción del estudio	92
8.2	Procedimiento de campo	93
8.3	Proceso de la información.....	95
8.4	Resultados obtenidos.....	95
8.4.1	Intersección: Eje 10 y Blvd. Adolfo Ruíz Cortines (Anillo Periférico)	96
8.4.2	Intersección: Eje 10 y Avenida San Jerónimo.....	97
8.4.3	Intersección: Eje 10 y Avenida Revolución	98
8.4.4	Intersección: Eje 10 y Avenida de los Insurgentes.....	99
8.4.5	Intersección: Eje 10 y Avenida Universidad.....	101
8.4.6	Intersección: Eje 10 y Cerro del Agua	102
8.4.7	Intersección: Eje 10 y Antonio Delfín Madrigal	103
8.4.8	Intersección: Eje 10 y Avenida Aztecas.....	105
8.4.9	Intersección: Eje 10 y Avenida Pacífico	106
8.4.10	Intersección: Eje 10 y Avenida División del Norte.....	107
8.4.11	Resumen de los Flujos de Saturación obtenidos en las intersecciones seleccionadas.....	108
8.5	Resultados estadísticos del Flujo de Saturación.....	109

8.6 Comparación del Flujo de Saturación de México con otros países.....	110
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
ANEXOS. AFOROS VEHICULARES Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS.	115

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Con el rápido desarrollo y crecimiento de las ciudades, la cantidad de vehículos se incrementan dramáticamente, lo cual provoca que la mayoría de las grandes ciudades del mundo presenten problemas de transporte, tales como la congestión del tránsito, el desorden, accidentes y contaminación ambiental. Este problema es un caso típico de la Ciudad de México, es por esto que se necesita una transformación óptima utilizando los recursos disponibles de una manera más racional.

El buen desarrollo de una ciudad depende de una manera muy importante de una buena infraestructura vial, que pueda soportar las necesidades de movimiento de tránsito vehicular actual y que se demande en un futuro.

Los estudios a cerca de capacidad y nivel de servicio de vialidades se hacen generalmente en intersecciones semaforizadas, pues es en donde se generan en la mayoría de los casos los problemas viales.

El procedimiento seguido para analizar la capacidad en intersecciones semaforizadas, se realiza mediante una comparación entre la demanda y la oferta por cada grupo de carriles. La demanda está representada por la cantidad de vehículos que utiliza cada grupo de carriles, y la oferta se refiere a la capacidad.

Contar con métodos suficientemente confiables para determinar el flujo de saturación para intersecciones semaforizadas es de suma importancia para el diseño adecuado de vías así como para el manejo efectivo del tránsito.

El flujo de saturación representa la cantidad de vehículos que pueden transitar por un grupo de carriles asumiendo que la fase verde dura una hora continua:

$$\frac{g}{C} = 1.0$$

Donde C es el tiempo total que dura un ciclo del semáforo en estudio y g es el tiempo que permanece dicho semáforo en su fase verde.

Actualmente la metodología ocupada en México para el cálculo del flujo de saturación se toma del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000), publicado por la Junta de Investigación del Transporte de Estados Unidos (TBR), el cual establece parámetros que solo deben ser ocupados en condiciones similares a las analizadas en Estados Unidos de América, en nuestro país dichos parámetros son ocupados ya que hasta el momento muy poco se ha hecho para adaptar dicha metodología a las condiciones que se presentan de forma local.

Esta investigación determinará el flujo de saturación en intersecciones semaforizadas de la Ciudad de México, ya que este valor es el más importante para calcular la capacidad y nivel de servicio para las intersecciones controladas por semáforos, con la finalidad de hacer diseños correctos de vialidades y la gestión eficaz del tránsito vehicular, además de reducir índices de contaminación y pérdidas de horas hombre que generan este tipo de intersecciones. Se logrará determinar a través de prácticas de campo en intersecciones seleccionadas de la Ciudad de México, ya que es de suma importancia debido a que las condiciones de Estados Unidos de América arrojan parámetros distintos de los que se deberían tener México, pues las condiciones entre ambos países son muy distintas.

HIPÓTESIS

El valor del flujo de saturación en la Ciudad de México, difiere del parámetro estándar dado en el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000), que se utiliza para determinar la capacidad y niveles de servicio en el diseño y operación de las intersecciones semaforizadas, pues estos parámetros están determinados con estudios en Estados Unidos de América y deben ser diferentes en México, ya que las condiciones del camino, del número de población, del tránsito y control que tiene México son distintas a las de ese país.

Las condiciones de México requieren normas y parámetros propios para conseguir una optimización en los recursos y una eficiencia operativa, trayendo consecuentemente una mejora en la calidad de vida de los ciudadanos. Por lo tanto, seguir utilizando los parámetros y normas del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000), tendrá como consecuencias el cometer errores en el diseño, la planeación y la construcción de la infraestructura vial en México.

OBJETIVO

Estimación del flujo de saturación base en intersecciones semaforizadas de la Ciudad de México, siguiendo las normas del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000), a fin de esgrimirlo en el cálculo de la capacidad y niveles de servicio de vialidades de México.

Comparar los resultados obtenidos con investigaciones anteriores en otros países del mundo incluyendo el de Estados Unidos de América, para desarrollar una relación empírica y estimar la intensidad del tránsito, el flujo de saturación y obtener mejores niveles de servicio y capacidad.

ANTECEDENTES

Para el cálculo de Capacidad y Niveles de Servicio en intersecciones semaforizadas, es importante que se utilicen las tasas de flujo saturación adecuadas para circunstancias específicas de cada intersección. Como resultado de la falta de datos locales para realizar distintos estudios a menudo se utilizan valores por omisión de desarrolladores de software en el extranjero. Esto puede conducir a resultados erróneos y decisiones inapropiadas con base en éstos.

El Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000), define la tasa de flujo de saturación base como la tasa máxima de flujo por carril que puede pasar a través de la intersección. Es decir, el número de vehículos en la cola que pueden atravesar la intersección semaforizada suponiendo que el carril tiene como tiempo disponible la luz verde efectiva durante una hora de tiempo, bajo las condiciones prevalecientes del tránsito, y se expresa en vehículos/hora/carril.

La metodología para el análisis operacional de intersecciones semaforizadas, del HCM, es muy utilizada y aceptada en los Estados Unidos de América. Sus parámetros y ecuaciones han sido validados para analizar el funcionamiento de intersecciones aisladas con problemas relativamente moderados de congestión. Estos procedimientos son rápidos y confiables para predecir si una

intersección operara por debajo o encima de su capacidad. Sin embargo, los procedimientos son generalmente limitados en su habilidad para evaluar sistemas complejos.

El HCM 2000, considera un flujo de saturación base de 1900 vehículos/hora/carril, para condiciones ideales y proporciona factores de ajuste que lo modifican en función del impacto que producen en la capacidad de la intersección.

Las condiciones ideales, según el HCM se refieren a:

- Ancho de carriles de 3.6 m.
- 0% de vehículos pesados.
- Accesos planos.
- Ausencia de estacionamientos y paradas de autobuses cerca de la intersección.
- Área con poco flujo peatonal y ciclistas.
- Utilización uniforme de los carriles.
- Solo flujos directos sin giros a la izquierda o derecha.

Resultados obtenidos de diversas investigaciones respecto al uso de las metodologías definidas en el HCM han mostrado que su efectividad no es satisfactoria al usar valores recomendados, particularmente cuando el valor de la demanda de vehículos se acerca a la capacidad de la vía. Esto se debe a que el comportamiento de los usuarios de las vialidades difiere en cada país y entre otras diferencias notables, en la Ciudad de México la densidad de población es mucho mayor que la de gran parte de los Estados Unidos de América, por lo que se puede deducir que el flujo de saturación local varía.

Resultados imprecisos del cálculo del flujo de saturación al no incorporar condiciones locales resultan en un bajo nivel de confiabilidad en el cálculo de la Capacidad y Nivel de Servicio en intersecciones semaforizadas.

CONTENIDO DE LA TESIS

Durante nueve capítulos se explican de forma breve y concisa los conceptos necesarios que llevarán a entender mejor el lenguaje de la Ingeniería de Tránsito y algunos de sus estudios, principalmente los de Flujo de Saturación en intersecciones semaforizadas; lo que hay atrás de éstos y de las vialidades por las que transitamos diariamente en la ciudad.

En el primer capítulo, se explican principalmente los conceptos de Capacidad y Niveles de Servicio, así como su función y el importante papel que tienen en la Ingeniería de Tránsito, definiendo y detallando los factores que afectan dicha capacidad haciendo que los Niveles de Servicio tengan una disminución en su medida cualitativa.

El capítulo dos, hace referencia a los principios del flujo del tránsito, haciendo mención de los tipos de flujo y sus características, así como las definiciones y relaciones básicas entre volumen-velocidad-densidad que se deben tener en cuenta para entender mejor el flujo de saturación y la operación de las intersecciones.

Dentro del capítulo tres, se encuentra todo lo relacionado con los semáforos y algunos dispositivos de control para el tránsito, siendo éstos unos de los elementos principales dentro de la gestión del tránsito

urbano. Se hace énfasis en los semáforos y su clasificación, además se define y se muestra el procedimiento de cálculo de los tiempos.

En el capítulo cuatro, se dedica únicamente a las intersecciones y lo que conlleva, es decir, su definición, clasificación y tipos. Haciendo énfasis en las intersecciones a nivel, pues son las que se van a estudiar en la metodología para obtener el flujo de saturación base en esta tesis. Además se identifican las ventajas e inconvenientes que puedan presentar estas intersecciones.

El capítulo cinco, muestra una introducción al Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000). Se desarrollan conceptos de capacidad y niveles de servicio en intersecciones semaforizadas, así como también todo lo relacionado a la metodología del análisis operacional en intersecciones con semáforo del HCM 2000 y sus valores por omisión.

En el capítulo seis, se determina qué es el flujo de saturación y algunos métodos para determinarlo, haciendo hincapié en el seguido por el HCM 2000; se explican cuáles son las condiciones ideales para obtener este parámetro y se muestran una serie de factores de ajuste con sus fórmulas. También se explica la metodología que se debe llevar a cabo en campo y algunas técnicas para realizar los aforos. Así como también se muestran algunos flujos de saturación que se han obtenido en investigaciones de distintos países.

El capítulo siete, describe la metodología en campo para obtener los datos necesarios para estimar el flujo de saturación y a la aplicación móvil utilizada, detallando cada paso a seguir para que la obtención de los aforos sea un éxito.

Dentro del capítulo ocho, se estima el valor del flujo de saturación en la Ciudad de México, haciendo una descripción del estudio, procedimiento de campo, el proceso de la información y los resultados obtenidos, así como un análisis de dichos resultados y una comparación con algunos países de los distintos continentes del mundo.

Por último, en el capítulo nueve, se exponen las conclusiones respecto al trabajo de investigación y desarrollo total de esta Tesis, además se dan una serie de recomendaciones según los resultados obtenidos.

Finalmente, en el anexo, se presentan algunos datos obtenidos en campo y cómo fue la obtención de los resultados de algunos de los accesos en las diez intersecciones que se analizaron para estimar el flujo de saturación de la Ciudad de México.

Capítulo 1.
DEFINICIÓN DE CONCEPTOS
DE CAPACIDAD VIAL

1. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS DE CAPACIDAD VIAL

El análisis de capacidad se lleva a cabo para determinar el tránsito máximo que puede circular en una sección de carretera dada. También se pretende estimar el máximo número de vehículos que pueden atravesar por el tramo seleccionado de una manera eficiente. La definición de los criterios de operación se lleva a cabo mediante la introducción del concepto de nivel de servicio. Rango de condiciones de operación que es definido para cada intersección o vialidad seleccionada y se relaciona con la cantidad de vehículos que operan en cada nivel de servicio.

1.1 Capacidad

Se define como el número máximo de vehículos que de una manera razonable puedan atravesar por un punto o una sección uniforme de un carril o de un camino durante un periodo de tiempo dado, bajo las condiciones prevalecientes del tránsito, de la infraestructura vial y de los controles.

Las condiciones del tránsito se refieren a la distribución del tránsito en el tiempo y en el espacio, y a su composición en tipos de vehículos como livianos, camiones, autobuses y vehículos recreativos.

Las condiciones de la estructura vial son las características físicas de la carretera o calle (de tránsito continuo o discontinuo, con o sin control de accesos, dividida o no, de dos o más carriles, etc.), el desarrollo de su entorno, las características geométricas (ancho de carriles y acotamientos, obstrucciones laterales, velocidad de proyecto, restricciones para el rebase y características de los alineamientos), y el tipo de terreno donde se aloja la obra.

Las condiciones de control hacen referencia a los dispositivos para el control del tránsito, tales como semáforos y señales restrictivas (alto, ceda el paso, no estacionarse, sólo vueltas a la izquierda, etc.).

Por lo tanto, la capacidad depende de las propias características de la vía: geometría, estado del pavimento y del tráfico, especialmente su composición. Además, se debe tener en cuenta las regulaciones de circulación existentes, como limitaciones de velocidad o prohibiciones de adelantamiento, así como las condiciones ambientales y meteorológicas. Estos dos últimos factores no se hallan lo suficientemente estudiados al no influir decisivamente, salvo en casos aislados.

Mediante los análisis de capacidad, también se estima la cantidad máxima de vehículos que el sistema vial puede acomodar mientras se mantiene una determinada calidad de operación, introduciéndose aquí el concepto de nivel de servicio.

1.2 Niveles de servicio

El nivel de servicio es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación dentro de un flujo vehicular y su percepción por el conductor y el pasajero. Estas condiciones se describen generalmente en términos de factores tales como velocidad y tiempo de recorrido, libertad de maniobras, interrupciones del tránsito, la comodidad y la seguridad vial.

El Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000) ha definido seis niveles de servicio. Cada nivel se designa con una letra, de la "A" a la "F". En donde el nivel de servicio "A" representa las mejores

condiciones de operación y el nivel de servicio “F” es el de peores condiciones. Cada nivel de servicio representa un rango y percepción de los conductores en cuanto a las condiciones de operación. La seguridad no está incluida en las medidas que establecen los niveles de servicio.

Las condiciones de operación de los niveles de servicio para segmentos básicos de autopistas son:

-Nivel de servicio A:

Representa circulación a flujo libre. Los usuarios no se ven afectados por ningún interruptor en la corriente del tránsito, es decir, el nivel general de comodidad y conveniencia proporcionado por la circulación es excelente.

-Nivel de servicio B:

Está aún en el rango de flujo libre, pero la presencia de pocos usuarios en la corriente de tránsito es notoria. El nivel de comodidad y conveniencia es algo inferior, pues la presencia de los otros vehículos comienza a influir en el comportamiento individual de cada uno.

-Nivel de servicio C:

Representa el flujo estable, marca el inicio del rango de flujo en el cual la operación de los usuarios en forma individual empieza a ser afectada significativamente por la intersección con otros usuarios en la corriente del tránsito. Por lo tanto, el nivel de comodidad y conveniencia desciende notablemente.

-Nivel de servicio D:

Pertenece a una circulación de alta densidad, aunque flujo estable. Pequeños incrementos en el flujo por lo general ocasionan problemas de funcionamiento e incluso la formación de pequeñas filas. El usuario experimenta un nivel general de comodidad y conveniencia bajo.

-Nivel de servicio E:

Representa condiciones de operación muy cercanas al nivel de mínima capacidad. La circulación es normalmente inestable, debido a que los aumentos del flujo o ligeras perturbaciones del tránsito producen colapsos. El nivel de comodidad y conveniencia es enormemente bajo, siendo muy elevada la frustración de los conductores.

-Nivel de servicio F:

Se usa para definir un flujo forzado. En estos lugares se provocan embotellamientos.

1.3 Factores que afectan la capacidad de servicio

1.3.1 Condiciones base

Muchos de los procedimientos en el HCM 2000 provienen de fórmulas, tablas o simples representaciones gráficas que forman una condición óptima estándar específica de referencia, que deberán ser ajustadas a las condiciones prevalecientes.

Las condiciones base asumen buen estado del tiempo, buenas condiciones del pavimento, usuarios familiarizados con facilidad de las vías, y sin ningún incidente que impida el flujo de tráfico.

Las condiciones base o ideales para flujo ininterrumpido son las siguientes:

- a) Ancho de carril de 3.6 metros.
- b) Espacio de 1.8 metros entre el borde del carril de circulación y la obstrucción o los objetos en el camino más cercanos.

- c) Velocidad de flujo libre de 100 km/h para carretera de varios carriles.
- d) 100% de vehículos ligeros en la corriente de tránsito.
- e) Terreno plano.
- f) La ausencia de zona de no rebasar en la carretera de dos carriles.
- g) No hay impedimentos a través del tránsito debido a señales de control y vehículos dando vuelta.

Las condiciones base para acceso en intersecciones incluyen:

- a) Ancho de carril de 3.6 metros.
- b) Calidad del nivel.
- c) No hay aparcamiento en los bordes del camino.
- d) Sólo vehículos particulares en los flujos de tránsito, sin autobuses urbanos en el carril de circulación.
- e) Intersecciones situadas fuera de la zona comercial y de negocios.
- f) No hay peatones.

En la mayoría de los análisis de capacidad, las condiciones predominantes defieren de las condiciones base ideales y los cálculos para obtener la capacidad, los valores de la tasa del flujo de servicio, por lo tanto, el nivel de servicio debe incluir un ajuste para reflejar esto. Las condiciones prevalecientes son generalmente categorizadas como las condiciones del camino, del tránsito, o del control.

1.3.2 Condiciones del camino

Las condiciones del camino incluyen los elementos geométricos que describen el camino. Éstos incluyen:

- a) Número de carriles.
- b) Tipo de vía y su desarrollo en la zona.
- c) Ancho del carril.
- d) Ancho de acotamiento y obstáculos laterales.
- e) Velocidad de diseño.
- f) Alineamiento vertical y horizontal.

El alineamiento vertical y horizontal de un camino depende de la velocidad para la que fue diseñado, según la topografía del lugar donde se ha construido.

- g) Disponibilidad de carril exclusivo en la intersección para dar vuelta.

1.3.3 Condiciones del tránsito

Las condiciones del tránsito que influyen en la capacidad y nivel de servicio, incluyen el tipo de vehículo, uso de carriles y distribución direccional.

- a) Tipos de vehículos.

El paso de vehículos pesados afectan la corriente de tránsito y el número de vehículos que pueden ser servidos en el camino. Los vehículos pesados son los vehículos que tienen más de cuatro neumáticos que tocan el pavimento.

Camiones, autobuses y vehículos con fines recreacionales son los tres grupos de vehículos pesados que afectan el tránsito en dos maneras:

- 1- Son más grandes que los vehículos ligeros y por lo tanto ocupan más lugar en la carretera.

2- Tienen capacidad de operación más pobre que los vehículos ligeros, particularmente con respecto a la aceleración, frenado y la capacidad para mantener la velocidad.

b) Uso de carriles y distribución direccional:

Por lo general los carriles internos se utilizan más que los carriles laterales.

La distribución direccional tiene mayor impacto en carreteras de dos carriles.

1.3.4 Condiciones de control

Para condiciones de flujo interrumpido, el tiempo de control disponible para la circulación es un elemento que afecta la capacidad y los niveles de servicio. La condición más crítica es la del semáforo, la cual depende del tipo de control que se utilice, el tipo de fases, la distribución del tiempo de luz verde, la duración del ciclo.

Capítulo 2.
PRINCIPIOS SOBRE EL
FLUJO DEL TRÁNSITO

2. PRINCIPIOS SOBRE EL FLUJO DEL TRÁNSITO

La corriente de tránsito de cualquier vialidad está definida bajo tres variables principales: volumen o valor del flujo, velocidad y densidad.

Al igual que muchos sistemas dinámicos, los medios físicos y estáticos del tránsito, tales como las carreteras, las calles, las intersecciones, las terminales, etc., están sujetos a ser solicitados y cargados por volúmenes de tránsito, los cuales poseen características espaciales y temporales. Al proyectar una carretera o calle, la selección del tipo de vialidad, las intersecciones, los accesos y los servicios, dependen fundamentalmente del volumen de tránsito o demanda que circulará durante un intervalo de tiempo dado, de su variación, de su tasa de crecimiento y su composición.

La importancia de la velocidad, como elemento básico para el proyecto de un sistema vial, queda establecida por ser un parámetro de cálculo de la mayoría de los demás elementos del proyecto. La velocidad debe ser estudiada, regulada y controlada con el fin de que origine un perfecto entre el usuario, el vehículo y la vía, de tal manera que siempre se garantice la seguridad.

2.1 Tipos de flujo del tránsito

El flujo de tráfico se puede clasificar en continuo y discontinuo.

-El flujo continuo:

Es aquel en el que el vehículo que va transitando por la vía solo se ve obligado a detenerse por razones inherentes al tráfico. Es el tráfico de las carreteras. Los vehículos se detienen cuando ocurre un accidente, cuando llegan a un destino específico, paradas intermedias, etc.

-El flujo discontinuo o interrumpido:

Es el característico de las calles, donde las interrupciones son frecuentes por cualquier motivo, siendo una de estas los controles de tránsito de las intersecciones como son los semáforos, los ceda el paso, etc.

2.2 Características del flujo del tránsito

Las tres características principales que se pueden explicar matemáticamente son:

- 1- La velocidad.
- 2- El volumen.
- 3- La densidad.

2.2.1 Velocidad

En general, el término velocidad se define como la relación entre el espacio recorrido y el tiempo que se tarda en recorrerlo. Es decir, para un vehículo representa su relación de movimiento, generalmente expresada en kilómetros por hora (km/h).

Para el caso de una velocidad constante, ésta se define como una función lineal de la distancia y el tiempo, expresada por la fórmula:

$$v = \frac{d}{t} \quad (2.1)$$

Donde:

v = velocidad constante (kilómetros por hora)

d = distancia recorrida (kilómetros)

t = tiempo de recorrido (horas)

Existen varios tipos básicos de medida de la velocidad de viaje:

- Velocidad de punto.
- Velocidad en un instante.
- Velocidad de recorrido.
- Velocidad de marcha.
- Velocidad de proyecto.

2.2.1.1 Velocidad de punto

Es la velocidad de un vehículo a su paso por un determinado punto de una carretera o una calle. Como dicha velocidad se toma en el preciso instante del paso del vehículo por el punto, también se le denomina *velocidad instantánea*.

2.2.1.2 Velocidad media temporal

Es la media aritmética de las velocidades de punto de todos los vehículos, o parte de ellos, que pasan por un punto específico de una carretera o calle durante un intervalo de tiempo seleccionado. Se dice entonces, que se tiene una distribución temporal de velocidades de punto. Para todas las velocidades de punto no agrupados, matemáticamente la velocidad media temporal se define como:

$$\bar{v}_t = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (2.2)$$

Donde:

\bar{v}_t = velocidad media temporal

v_i = velocidad del punto del vehículo i

n = número total de vehículos observados en el punto o tamaño de la muestra

2.2.1.3 Velocidad media espacial

Es la media aritmética de las velocidades de punto de todos los vehículos que en un instante dado se encuentran en un tramo de carretera o calle. Se dice entonces, que se tiene una distribución espacial de velocidades de punto.

Para un espacio o distancia dados, la velocidad media espacial se calcula dividiendo la distancia por el promedio de los tiempos empleados por los vehículos en recorrerla. Esto es:

$$\bar{v}_e = \frac{d}{\bar{t}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{v_i}\right)} \quad (2.3)$$

Donde:

\bar{v}_e = velocidad media espacial

d= distancia dada o recorrida.

\bar{t} = tiempo promedio de recorrido = $\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$

2.2.1.4 Velocidad de recorrido

Llamada también *velocidad global o de viaje*, es el resultado de dividir la distancia recorrida, desde el inicio hasta el fin del viaje, entre el tiempo total que se empleó en recorrerla. En el tiempo total de recorrido están incluidas todas aquellas demoras operacionales de velocidad y paradas provocadas por la vía, el tránsito y los dispositivos de control, ajenos a la voluntad del conductor. No incluye aquellas demoras fuera de la vía, como pueden ser las correspondientes a gasolineras, restaurantes, lugares de recreación, etc. La velocidad de recorrido sirve principalmente para comparar condiciones de fluidez en ciertas rutas; ya sea una contra otra, o bien, en una misma ruta cuando se han realizado cambios, para medir los efectos. *La velocidad media de recorrido* es la suma de sus distancias recorridas divididas por la suma de los tiempos totales de viaje.

2.2.1.5 Velocidad de marcha o velocidad de crucero

Es el resultado de dividir la distancia recorrida entre el tiempo durante la cual el vehículo estuvo en movimiento. Para obtener la velocidad de marcha en un viaje normal, se descontará del tiempo total de recorrido, todo aquel tiempo en que el vehículo se hubiese detenido por cualquier causa asociada a la operación del tránsito. Por lo tanto esta velocidad, por lo general, será de valor superior a la de recorrido.

2.2.1.6 Velocidad de proyecto o velocidad de diseño

Es la velocidad máxima a la cual pueden circular los vehículos con seguridad sobre una sección específica de una vía, cuando las condiciones atmosféricas y del tránsito son tan favorables que las características geométricas del proyecto gobiernan la circulación. Todos aquellos elementos geométricos del alineamiento horizontal, vertical y transversal, tales como radios mínimos, pendientes máximas, distancia de visibilidad, sobreelevaciones, anchos de carriles y acotamientos, anchuras y alturas libres, etc., dependen de la velocidad de proyecto y varían con un cambio de ésta.

En Estados Unidos y en Europa se han usado velocidades de proyecto máximas hasta de 140 km/h. Sin embargo, hay una tendencia a reducir las a 120 km/h (Europa) y 112 km/h (EE.UU.). En México, al igual que en Colombia, las velocidades de proyecto fluctúan entre 40 y 110 km/h, dependiendo del tipo de vía seleccionada.

2.2.2 Volumen y Tasa de flujo

Se define *volumen de tránsito*, como el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados, de un carril o de una calzada, durante un periodo determinado. Se expresa como:

$$Q = \frac{N}{T} \quad (2.4)$$

Donde:

Q = vehículos que pasan por unidad de tiempo (vehículos/periodo)

N = número total de vehículos que pasan (vehículos)

T = período determinado (unidades de tiempo)

La *tasa de flujo*, es el valor horario equivalente a aquellos en los que los vehículos pasan por un punto dado, una sección de un carril o un camino, durante un intervalo de tiempo dado, menor que una hora, usualmente 15 minutos.

La diferencia entre el volumen y la tasa de flujo es importante. El volumen es el número actual de vehículos observados o asignados que pasan por un punto durante un intervalo de tiempo. El valor del flujo representa el número de vehículos que pasan por un punto durante un intervalo de tiempo menor que una hora, pero expresada como un valor horario equivalente.

El valor del flujo se obtiene tomando el número de vehículos observados en un período de tiempo menor a una hora, dividiéndolo entre el tiempo (en fracción de hora), en el cual fueron observados. Por ejemplo, un volumen de 100 vehículos observados en un período de 15 minutos se calcularía la tasa de flujo como 100 vehículos/0.25 hora o 400 vehículos/hora.

2.2.3 Variación del volumen de tránsito en la hora de máxima demanda (factor hora pico)

Un volumen horario de máxima demanda, a menos que tenga una distribución uniforme, no necesariamente significa que el flujo sea constante durante toda la hora. Esto significa que existen períodos cortos dentro de la hora con tasas de flujo mucho mayores a la de la hora misma. Para la hora de máxima demanda, se llama factor de la hora de máxima demanda o factor, también conocida como factor hora pico, FHMD, a la relación entre el volumen horario de máxima demanda, VHMD, y el flujo máximo, $q_{m\acute{a}x}$, que se presenta durante un período dado dentro de dicha hora. Matemáticamente se expresa como:

$$FHMD = \frac{VHMD}{N \cdot (q_{m\acute{a}x})} \quad (2.5)$$

Donde:

FHMD = factor de la hora de máxima demanda

VHMD = volumen horario de máxima demanda

N = número de períodos durante la hora de máxima demanda

$q_{m\acute{a}x}$ = volumen máximo que se presenta en el período de la hora de máxima demanda

Los períodos dentro de la hora de máxima demanda pueden ser de 5, 10 ó 15 minutos, utilizándose este último con mayor frecuencia.

2.2.4 Densidad

La densidad está definida como el número de vehículos que ocupan una longitud específica, de una vialidad en un momento dado. Generalmente se expresa en vehículos por kilómetro (veh/km), ya sea referido a un carril o a todos los carriles de una calzada. Se calcula como:

$$k = \frac{N}{d} \quad (2.6)$$

Donde:

k = densidad

N = número de vehículos que ocupan una longitud específica

d = longitud específica de una vialidad

Capítulo 3.
SEMÁFOROS

3. SEMÁFOROS

Los semáforos son dispositivos electromagnéticos y electrónicos proyectados específicamente para facilitar el control del tránsito de vehículos y peatones, mediante indicaciones visuales de luces de colores universalmente aceptados, como lo son el verde, el amarillo y el rojo. Su finalidad principal es la de permitir el paso, alternadamente, a las corrientes de tránsito que se cruzan, permitiendo el uso ordenado y seguro del espacio disponible.

A medida que pasa el tiempo, el congestionamiento y los accidentes aumentan, por lo que para su atenuación, el uso de semáforos ha alcanzado un notable desarrollo. Actualmente no se puede suponer, en las grandes ciudades del mundo, que el control del tránsito no se realice con los sistemas más avanzados de semáforos, incluyendo la coordinación computarizada y la incorporación de detectores automáticos de vehículos, que dependiendo de su variación hacen que cambie de forma dinámica y continua el tiempo asignado a cada acceso de las intersecciones. Esto ha permitido establecer estrategias para el control del tránsito a lo largo de las diferentes horas del día a través de programas específicos para periodos de máxima y mínima demanda.

Los semáforos se usarán para desempeñar, entre otras, las siguientes funciones:

- a) Interrumpir periódicamente el tránsito en una corriente vehicular y/o peatonal para permitir el paso de otra corriente vehicular.
- b) Regular la velocidad de los vehículos para mantener la circulación continua a una velocidad constante.
- c) Controlar la circulación por carriles.
- d) Eliminar o reducir el número y gravedad de algunos tipos de accidentes, principalmente a los que implican colisiones perpendiculares.

3.1 Clasificación de los semáforos

Con base en el mecanismo de operación de los controles de los semáforos, éstos se clasifican en:

- 1- Semáforos para el control del tránsito de vehículos:
 - No accionados por el tránsito.
 - Accionados por el tránsito.
 - Totalmente accionados por el tránsito.
 - Parcialmente accionados por el tránsito.
- 2- Semáforos para pasos peatonales:
 - En zonas de alto volumen peatonal.
 - En zonas escolares.
- 3- Semáforos especiales:
 - De destello.
 - Para regular el uso de carriles.
 - Para puentes levadizos.
 - Para maniobras de vehículos de emergencia.
 - Con barreras para indicar aproximación de trenes.

Los colores de los semáforos deberán ser como se sigue:

1- Rojo fijo:

Los conductores de los vehículos se detendrán antes de la raya de parada. Los peatones no cruzarán la vía, a menos que algún semáforo les dé la indicación de paso.

2- Amarillo fijo:

Advierte a los conductores de los vehículos que está a punto de aparecer la luz roja y que el flujo vehicular que regula la luz verde debe detenerse. De la misma manera avisa a los peatones que no disponen del tiempo suficiente para cruzar, excepto cuando exista algún semáforo indicándoles que pueden realizar el cruce. Sirve para despejar el tránsito de una intersección y para evitar frenadas bruscas.

3- Verde fijo:

Los conductores de los vehículos podrán seguir de frente o dar vuelta a la derecha o a la izquierda, a menos que una señal prohíba dichas vueltas. Los peatones que avancen hacia el semáforo podrán cruzar, a menos que algún otro semáforo les indique lo contrario.

4- Rojo intermitente:

Cuando se ilumine una lente roja con destellos intermitentes, los conductores harán alto obligatorio y se detendrán antes de la raya de parada. Se empleará en el acceso a una vía principal.

5- Amarillo intermitente:

Cuando se ilumine una lente amarilla con destellos intermitentes, los conductores de los vehículos realizarán el cruce con precaución. Se empleará en la vía que tenga la preferencia.

6- Verde intermitente:

Cuando una lente verde funcione con destellos intermitentes, advierte a los conductores el final del tiempo de luz verde.

Las flechas direccionales deberán apuntar hacia el sentido de circulación. La flecha vertical apuntando hacia arriba, indica circulación de frente. La flecha horizontal indica vuelta aproximadamente en ángulo recto hacia la izquierda o hacia la derecha. La flecha oblicua, a 45° apuntando hacia arriba, indica vueltas a calles que forman ángulos distintos al de 90°.

La cara de un semáforo es el conjunto de unidades ópticas (lente, reflector, lámpara y portalámpara) que están orientadas en la misma dirección. Como mínimo habrá dos caras para cada acceso y en su caso se complementarán con semáforos para peatones ubicados en los extremos de cada paso peatonal.

3.1.1 Semáforos de tiempo fijo

Los semáforos de tiempo fijo se utilizan en intersecciones donde los patrones de tránsito son relativamente estables, o en las que las variaciones de intensidad de la circulación se pueden adaptar a un programa previsto, sin ocasionar demoras o congestionamientos excesivos.

Los controles de tiempo fijo, se adaptan especialmente a intersecciones en las que se desea sincronizar el funcionamiento de los semáforos con los de otras instalaciones próximas.

3.1.2 Semáforos no accionados por el tránsito

Son los que regulan las circulaciones de acuerdo con un programa o una serie de programas de tiempos, previamente establecidos. Se usarán en intersecciones donde los volúmenes de tránsito tienen una variación constante.

3.1.3 Semáforos accionados por el tránsito

Son aquellos cuya operación varía de acuerdo a las demandas del tránsito que se registran a través de detectores, los cuales suministran la información a un control maestro computador.

Se usarán en las intersecciones donde los volúmenes de tránsito fluctúan considerablemente en forma irregular, y en donde las interrupciones de la circulación deben ser mínimas en la dirección principal.

3.2 Términos básicos

En una intersección, el flujo total de vehículos que llega a cada uno de sus accesos debe ser dividido en diferentes fases de movimiento, en cada uno de los cuales se efectúan un desplazamiento específico de vehículos. Ciertos movimientos reciben el derecho al uso del espacio por medio de una señal verde o de siga, mientras que los otros son detenidos con una señal de rojo o de alto.

En el análisis del control de intersecciones con semáforo y en los requisitos para la distribución de sus tiempos, es necesario precisar algunos términos básicos o parámetros de tiempo y así evitar posibles confusiones:

- **Indicación de señal:** es el encendido de una de las luces del semáforo o una combinación de varias luces al mismo tiempo.
- **Ciclo o longitud del ciclo:** tiempo necesario para que el disco indicador del semáforo efectúe una revolución completa. En otras palabras, es el tiempo requerido para una secuencia completa de todas las indicaciones de señal del semáforo.
- **Movimiento:** maniobra o conjunto de maniobras de un mismo acceso que tienen el derecho de paso simultáneamente y forman una misma fila.
- **Intervalo:** cualquiera de las diversas divisiones del ciclo, durante la cual no cambian las indicaciones de señal del semáforo.
- **Fase:** parte del ciclo asignada a cualquier combinación de uno o más movimientos que reciben simultáneamente el derecho de paso, durante uno o más intervalos. Es la selección y ordenamiento de movimientos simultáneos. Una fase puede significar un solo movimiento vehicular, un solo movimiento peatonal, o una combinación de movimientos vehiculares y peatonales. Una fase comienza con la pérdida del derecho de paso de los movimientos que entran en conflicto con los que lo ganan. Un movimiento pierde el derecho de paso en el momento de aparecer la indicación ámbar.

- Secuencia de fases: orden predeterminado en que ocurren las fases del ciclo.
- Reparto: porcentaje de la longitud del ciclo asignado a cada una de las diversas fases.
- Intervalo de despeje: tiempo de exposición de la indicación ámbar del semáforo que sigue al intervalo verde. Es un aviso de precaución para pasar de una fase a la siguiente.
- Intervalo todo rojo: tiempo de exposición de una indicación roja para todo el tránsito que se prepara a circular. Es utilizado en la fase que recibe el derecho de paso después del ámbar de la fase que lo pierde, con el fin de dar un tiempo adicional que permita a los vehículos, que pierden el derecho de paso, despejar la intersección antes de que los vehículos, que lo ganan, reciban el verde. Se aplica sobre todo en aquellas intersecciones que sean excesivamente anchas. También puede ser utilizado para crear una fase exclusiva para peatones.
- Intervalo de cambio de fase: intervalo que puede consistir de solamente en un intervalo de cambio de ámbar o que puede incluir un intervalo adicional de despeje todo rojo.

3.2.1 Altura de semáforos

Para un buen funcionamiento, la parte inferior de la cara del semáforo tendrá una altura libre de:

- a) Para semáforos con soporte del tipo poste (Figura 3.1):
 Altura mínima 2.50 metros.
 Altura máxima 4.50 metros.

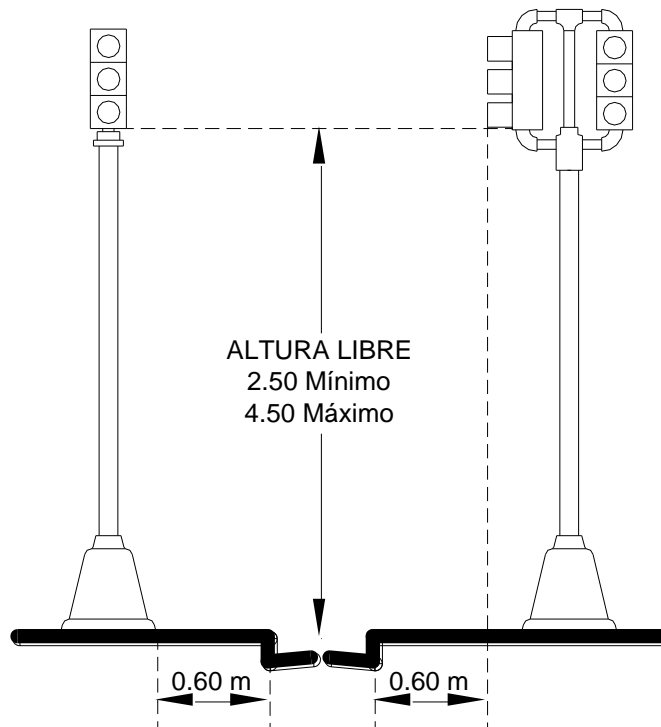


Figura 3.1 Semáforo con soporte tipo poste.
 Fuente: DGST, SCT.

- b) Para semáforos con soporte del tipo ménsula larga (figura 3.2):
Altura mínima 5.50 metros.
Altura máxima 6.00 metros.

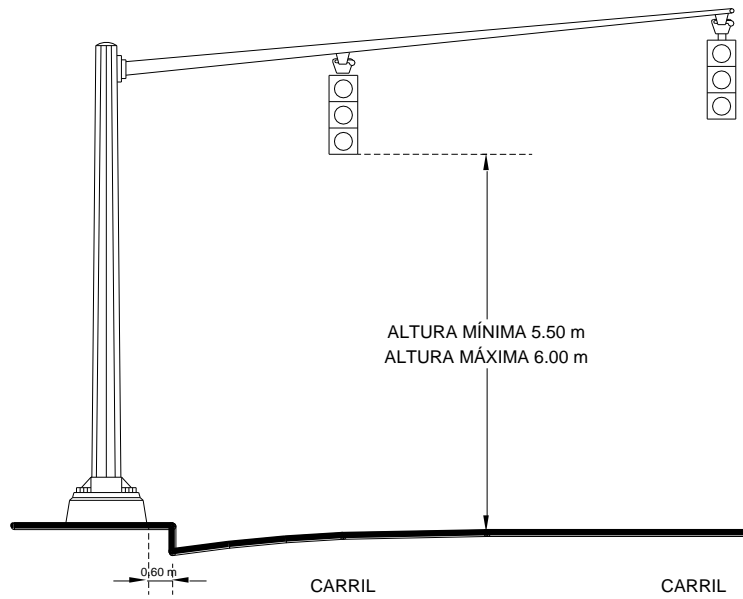


Figura 3.2 Semáforo con soporte tipo ménsula larga.
Fuente: DGST, SCT.

- c) Para semáforos suspendidos por cable (Figura 3.3):
Altura mínima 5.50 metros.
Altura máxima 6.00 metros.

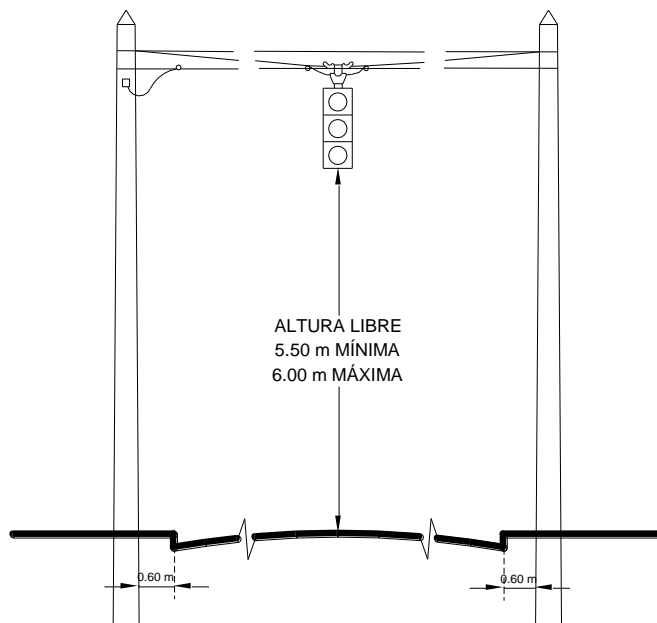


Figura 3.3 Semáforo suspendido por cable.
Fuente: DGST, SCT.

3.3 Cálculo de los tiempos del semáforo

Para obtener un mínimo de demoras, cada fase debe incluir el mayor número posible de movimientos simultáneos. Así se logrará admitir un mayor volumen de vehículos en la intersección.

Una fase comienza con la pérdida del derecho de paso, final del verde, de los movimientos que están en conflicto con los que ganan el derecho. Esto es, la fase comienza con el ámbar que previene para detener los movimientos de los que pierden el derecho de paso y termina con el final del verde de los que lo tenían. Por lo tanto, una fase consta de un intervalo ámbar, uno todo rojo y uno verde.

En la figura 3.4 se muestra una intersección de cuatro accesos operada con un semáforo de dos fases. En ella se observa en forma esquemática los conceptos de longitud de ciclo, intervalos y fases.

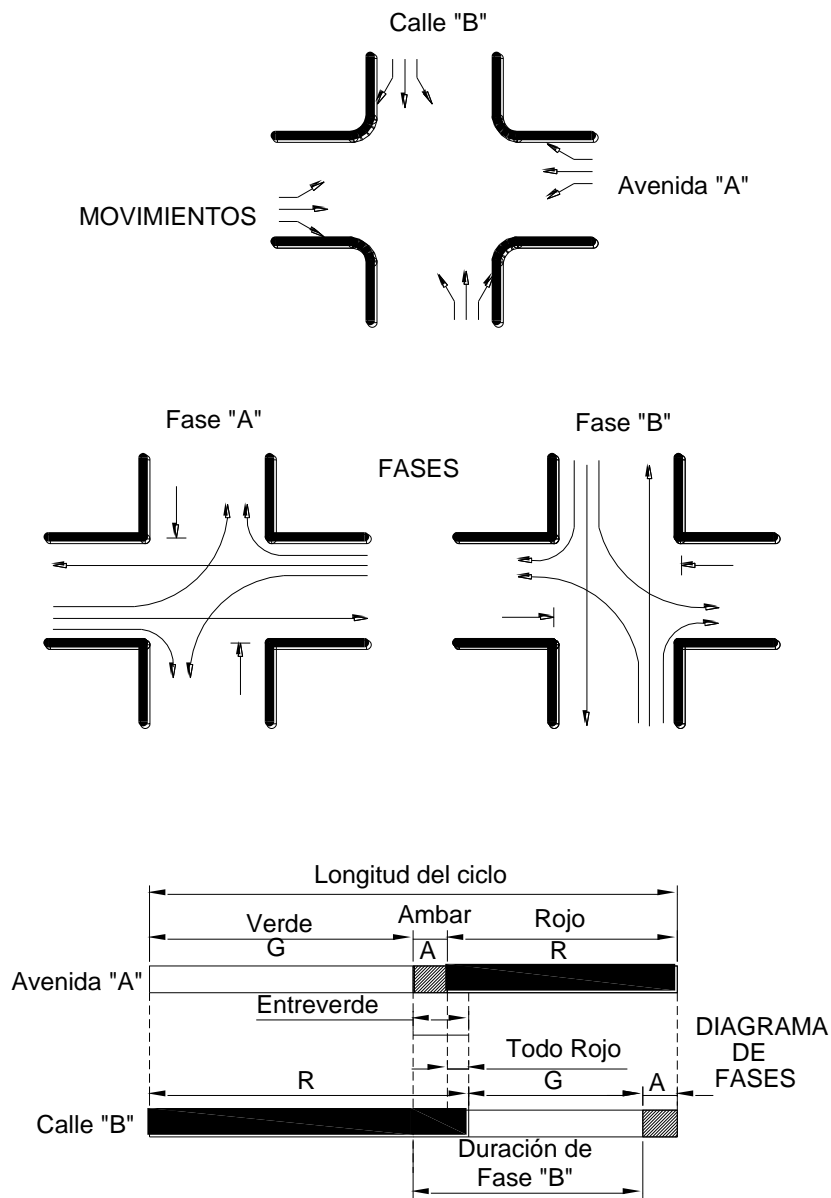


Figura 3.4 Fases y diagrama de fases en una intersección con semáforo.
Fuente: Ingeniería de Tránsito (Cal y Mayor R. & Cárdenas G., 2010)

La distribución de los tiempos en cada fase debe estar en relación directa con los volúmenes de tránsito de los movimientos correspondientes. En otras palabras, la duración de cada fase y del ciclo dependerá de la demanda.

A continuación se presenta de manera general los diversos elementos a tener en cuenta en el cálculo de los tiempos del semáforo y su reparto en las diferentes fases:

3.3.1 Intervalo de cambio de fase

La función principal del intervalo de fase (figura 3.5), es la de alertar a los usuarios de un cambio en la asignación del derecho al uso de la intersección.

Para calcular el intervalo de cambio de fase, que consiste el tiempo de reacción del conductor, tiempo y espacio de desaceleración y el tiempo necesario de despeje de la intersección. Se puede utilizar ecuación 3.1:

Intervalo de cambio = Ámbar + Todo Rojo

$$y = \left(t + \frac{v}{2a} \right) + \left(\frac{W+L}{v} \right) \quad (3.1)$$

Donde:

y = intervalo de cambio de fase, ámbar más todo rojo (s)

t = tiempo de percepción-reacción del conductor (usualmente 1.00 s)

v = velocidad de aproximación de los vehículos (m/s)

a = tasa de deceleración (valor usual 3.05 m/s²)

W = ancho de la intersección (m).

L = longitud del vehículo (valor típico 6.10 m)

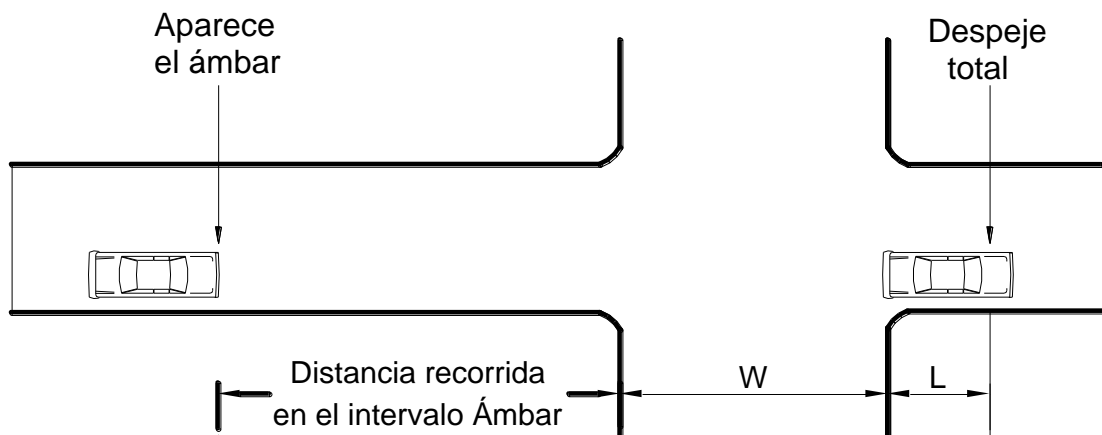


Figura 3.5 Intervalo de cambio de fase.

Fuente: Ingeniería de Tránsito (Cal y Mayor R. & Cárdenas G., 2010)

3.3.2 Longitud del ciclo

F. V. Webster con base en observaciones de campo y simulación de un amplio rango de condiciones de tránsito, demostró una demora mínima de todos los vehículos en una intersección con semáforo, se puede obtener para una longitud de ciclo óptimo de:

$$C_o = \frac{1.5L+5}{1-\sum_{i=1}^{\varphi} Y_i} \quad (3.2)$$

Donde:

C_o = tiempo óptimo del ciclo (s)

L = tiempo total perdido por ciclo (s)

Y_i = máximo valor de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación para el acceso o movimiento o carril crítico de la fase i

φ = número de fases

El intervalo de valores aceptables para la longitud de un ciclo determinado, está entre el 75% y el 150% del ciclo óptimo, para el cual las demoras nunca serán mayores en más del 10% al 20% de la demora mínima.

3.3.3 Vehículos equivalentes

Si todos los vehículos que salen de una intersección con semáforo son automóviles que continúan de frente, se tendrán las tasas máximas de flujo, a intervalos aproximadamente iguales. Sin embargo, en la mayoría de los casos la situación es más compleja por la presencia de vehículos pesados y movimientos hacia la izquierda y hacia la derecha. Para tener en cuenta estos aspectos, es necesario introducir factores de equivalencia.

El factor de ajuste por efecto de vehículos pesados, se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{VP} = \frac{100}{100 + P_C(E_C - 1) + P_B(E_B - 1) + P_R(E_R - 1)} \quad (3.3)$$

Donde:

FHV = factor de ajuste por efecto de vehículos pesados

PT = porcentaje de camiones

PB = porcentaje de autobuses

PR = porcentaje de vehículos recreativos

ET = automóviles equivalentes a un camión

EB = automóviles equivalentes a un autobús

ER = automóviles equivalentes a un vehículo recreativo

Por otra parte, se requiere tener factores por movimientos de vuelta, puesto que en estas maniobras los vehículos generalmente consumen mayor tiempo que los vehículos que siguen de frente. Estos factores, E_v , que se utilizan para convertir automóviles que dan vuelta a automóviles equivalentes que no la dan, varían de 1.4 a 1.6 para vueltas a la izquierda y de 1.0 a 1.4 para vueltas a la derecha. Igualmente, los volúmenes horarios de máxima demanda, VHMD, deben ser convertidos a tasas de flujo, q , a través del factor de la hora de máxima demanda, FHMD.

De esta manera, los volúmenes horarios de máxima demanda, VHMD, se convierten a flujos de automóviles directos, que no dan vuelta, equivalentes por hora, mediante la siguiente expresión:

$$q_{ADE} = \frac{VHMD}{FHMD} \left(\frac{1}{f_{VP}} \right) (E_V) \quad (3.4)$$

3.3.4 Flujo de saturación y tiempo perdido

Cuando el semáforo cambia a verde, el paso de los vehículos que cruzan la línea de ALTO se incrementa rápidamente a una tasa llamada flujo de saturación, la cual permanece constante hasta que la fila de vehículos se disipa o hasta que termina el verde. La tasa de vehículos que cruzan la línea al arrancar es menor durante los primeros segundos, mientras los vehículos aceleran hasta alcanzar una velocidad de marcha nominal. Similarmente, durante un período posterior a la terminación del verde, la tasa de vehículos que cruzan la línea es menor debido a que algunos vehículos disminuyen su velocidad o se detienen.

El flujo de saturación es la tasa máxima de vehículos que cruzan la línea que puede ser obtenida, cuando existen filas y éstas aún persisten hasta el final del período verde. En este caso, se tiene un período de verde completamente saturado. La figura 3.6 muestra las relaciones fundamentales que caracterizan este fenómeno:

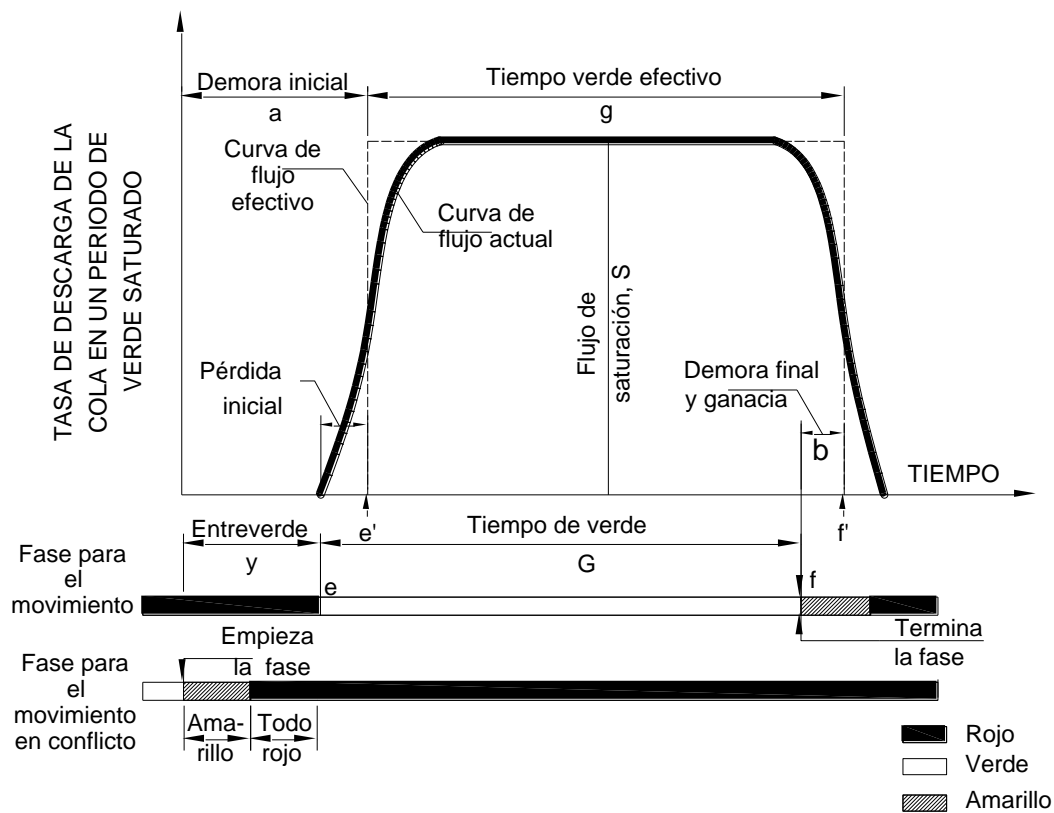


Figura 3.6 Modelo básico del flujo de saturación.
Fuente: Ingeniería de Tránsito (Cal y Mayor R. & Cárdenas G., 2010)

La línea punteada indica el modelo básico o curva de flujo efectivo, que reemplaza la curva de flujo actual de vehículos que cruzan la línea por un rectángulo de igual área, cuya altura es el *flujo de saturación* s y cuyo ancho es el *tiempo verde efectivo* g . En otras palabras, el área bajo la curva, sg , representa el máximo número de vehículos que cruzan la línea de un ciclo promedio.

El tiempo entre los comienzos de los períodos de verde G y verde efectivo g , esto es ee' , se considera como una pérdida inicial. Igualmente, el tiempo entre los finales de los períodos de verde y verde efectivo, ff' , se consideran como una ganancia final. Por lo tanto, el verde efectivo para la fase i es:

$$g_i = G_i + ff' - ee' \quad (3.5)$$

La demora inicial a , se define como la suma del tiempo entreverde o intervalo de cambio de fase y_i y la pérdida inicial ee' :

$$a = y_i + ee'$$

La demora final b , se define simplemente con la ganancia final ff' :

$$b = ff'$$

Entonces, el tiempo perdido por fase, l_i , es la diferencia entre la demora inicial y la ganancia final:

$$l_i = a - b$$

$$l_i = y_i + ee' - ff' \quad (3.6)$$

De la ecuación (3.5):

$$ee' - ff' = G_i - g_i$$

Reemplazando en la ecuación (3.6):

$$l_i = y_i + G_i - g_i \quad (3.7)$$

Por lo general, el intervalo de cambio de fase y_i , de una fase i es igual al intervalo ámbar A_i :

$$y_i = A_i$$

Por lo tanto, la ecuación (3.7) se transforma en:

$$l_i = G_i + A_i - g_i \quad (3.8)$$

Si se supone que la pérdida inicial ee' es igual a la ganancia final ff' , entonces:

$$g_i = G_i$$

$$l_i = y_i = A_i \quad (3.9)$$

El tiempo total L perdido del ciclo es:

$$L = \left(\sum_{i=1}^{\phi} l_i \right) + TR \quad (3.10)$$

Donde Tr representa el tiempo total de todo rojo durante el ciclo, en caso de existir.

3.3.5 Asignación de fase verde

El tiempo efectivo total g_T , disponible por ciclo para todos los accesos de la intersección, está dado por:

$$g_T = C - L = C - [(\sum_{i=1}^{\varphi} l_i) + TR] \quad (3.11)$$

Donde:

g_T = tiempo verde efectivo total por ciclo disponible para todos los accesos.

C = longitud actual del ciclo (redondeando C_0 a los 5 segundos más cercanos).

Para obtener una demora total mínima en la intersección, el tiempo verde efectivo total g_T debe distribuirse entre las diferentes fases en proporción a sus valores de Y_i , así:

$$g_i = \frac{Y_i}{\sum_{i=1}^{\varphi} Y_i} (g_T) = \frac{Y_i}{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_{\varphi}} \quad (3.12)$$

Y_i es el valor máximo de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación, para el acceso o movimiento o carril crítico de la fase i . De la ecuación (3.8), el tiempo verde real G_i , para cada fase i se obtiene como:

$$G_i = g_i + l_i - A_i \quad (3.13)$$

O lo que es lo mismo para φ fases:

$$\begin{aligned} G_1 &= g_1 + l_1 - A_1 \\ G_2 &= g_2 + l_2 - A_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ G_{\varphi} &= g_{\varphi} + l_{\varphi} - A_{\varphi} \end{aligned}$$

3.4 Objetivos de la sincronización de los semáforos

Los principales objetivos de la sincronización de un semáforo en una intersección son, reducir la demora promedio de todos los vehículos así como, la probabilidad de accidentes. Estos objetivos se alcanzan minimizando los puntos posibles de conflicto, cuando se asigna el derecho de paso a los diferentes flujos vehiculares en momentos diferentes. Sin embargo, el objetivo de reducir la demora algunas veces se contrapone con el de reducción de accidentes. Esto se debe a que el número de fases distintas, debe conservarse como un mínimo para reducir la demora promedio, mientras que puede requerirse un número mucho mayor de fases distintas, para separar todos los flujos vehiculares. Cuando exista esta situación, es esencial aplicar un criterio de ingeniería para determinar una solución de componerla. Sin embargo, por lo general lo que se acostumbra es adaptar un sistema de dos fases siempre que sea posible, cuando la duración de ciclo práctica más corta que sea consistente con la demanda. Empero, para una intersección compleja, puede ser necesario emplear un sistema de multifase (tres o más fases) para alcanzar los principales objetivos de diseño.

3.5 Clasificación de los dispositivos de control

Se denominan dispositivos para el control del tránsito a las señales, marcas, semáforos y cualquier otro dispositivo, que se colocan sobre o adyacente a las calles y carreteras por una autoridad pública, para prevenir, regular y guiar a los usuarios de las mismas. Los dispositivos de control indican a los usuarios las precauciones (prevenciones) que deben tener en cuenta, las limitaciones (restricciones) que gobiernan el tramo de circulación y las informaciones (guías) estrictamente necesarias, dadas las condiciones específicas de la calle o carretera.

Los dispositivos para el control de tránsito se clasifican en:

- 1- Señales:
 - Preventivas.
 - Restrictivas.
 - Informativas.

- 2- Marcas:
 - Rayas.
 - Símbolos.
 - Letras.

- 3- Obras y dispositivos diversos:
 - Cercas.
 - Defensas.
 - Indicadores de obstáculos.
 - Indicadores de alineamiento.
 - Tachuelas o botones.
 - Reglas y tubos guías.
 - Bordos.
 - Vibradores.
 - Guardaganados.
 - Indicadores de curva peligrosa.

- 4- Dispositivos para protección en obra:
 - Señales preventivas, restrictivas e informativas.
 - Canalizaciones.
 - Señales manuales.

- 5- Semáforos:
 - Vehiculares.
 - Peatonales.
 - Especiales.

Para ser efectivo, un dispositivo de control de tránsito debe:

- Satisfacer una necesidad.
- Llamar la atención.
- Transmitir un mensaje claro y simple.
- Causar el respeto de los usuarios del camino.
- Dar un tiempo adecuado para la respuesta adecuada.

Para asegurar que un dispositivo de control de tránsito posee estas cinco propiedades, el Manual sobre Dispositivos de Control de Tránsito Uniforme (MUTCD) recomienda que los ingenieros consideren los siguientes cinco factores:

- 1- Diseño. El dispositivo debe diseñarse con una combinación de tamaño, color y forma que transmita un mensaje y cause el respeto y la atención del conductor.
- 2- Ubicación. El dispositivo debe ubicarse dentro del cono de visión del observador, de modo que el conductor disponga de un tiempo adecuado de respuesta, cuando maneje a velocidad normal.
- 3- Operación. El dispositivo debe usarse de manera que asegure la observancia de los requerimientos de tránsito en forma uniforme y consistente.
- 4- Mantenimiento. Debe darse mantenimiento regular al dispositivo, para asegurar que se conserve la legibilidad.
- 5- Uniformidad. Para facilitar el reconocimiento y el entendimiento de estos dispositivos por los conductores, deben usarse dispositivos similares en ubicaciones con características geométricas y de tránsito semejante.

Además de estas consideraciones, es esencial que los ingenieros eviten el uso de dispositivos de control que entren en conflicto entre sí en el mismo lugar. Es imperativo que los dispositivos de control se auxilien entre sí, para transmitir el mensaje requerido al conductor.

Capítulo 4.

INTERSECCIONES

4. INTERSECCIONES

Las intersecciones son parte de un sistema existente de calles y vialidades, en aquellos puntos donde se unen los elementos, las cuales funcionan como un conjunto de interrelaciones muy complejas. Las características de operación de este sistema son funcionalmente dependientes del número y tipos de usuarios que requieren el servicio, esto es particularmente cierto cuando los volúmenes de tránsito se incrementan o cambian su naturaleza, es común que la intersección sea incapaz de servir la demanda agregada o alterada.

Uno de los sitios que tanto en las calles como en las carreteras que más conflictos presentan son las intersecciones, es decir, el lugar donde dos o más vías se cruzan. También se llama entronques, cruceros, etcétera. Las intersecciones han evolucionado con la tecnología y la presión de los grandes volúmenes de tránsito, llegándose a verdaderos alardes de la ingeniería vial, con varios niveles y múltiples ramas de enlace.

4.1 Definición de intersección

Se llama intersección, al área donde dos o más vías terrestres se unen o cruzan.

Se denomina también como intersección a un área que es compartida por dos o más caminos, y cuya función principal es posibilitar el cambio de dirección de la ruta.

La intersección varía en complejidad desde un simple crucero, con sólo dos caminos que se cruzan entre sí en ángulo recto, hasta una intersección más compleja, en la cual se cruzan tres o más caminos dentro de la misma área. Por tanto, las características propias de las intersecciones influyen en las decisiones de los conductores, respecto de cuál de las rutas alternativas tomar. Este esfuerzo, no se requiere en las áreas de la carretera que no tienen cruces, a parte de la razón por la cual las intersecciones tienden a presentar un alto potencial en accidentes. El flujo de tránsito total en cualquier carretera depende en gran medida del funcionamiento eficiente de los caminos que tienen intersecciones, éstas operan a una capacidad menor que las secciones de paso a través de camino.

4.2 Clasificación de intersecciones

Las intersecciones se clasifican en tres categorías:

- A desnivel sin rampas.
- A desnivel con rampas (comúnmente conocidas como distribuidores viales).
- A nivel.

4.2.1 Intersecciones a desnivel

Las intersecciones a desnivel constan de estructuras que distribuyen el tránsito para que cruce a niveles diferentes sin interrupción (distancias verticales). El potencial de accidentes en las intersecciones a desnivel se reduce, porque se eliminan muchos conflictos potenciales entre los flujos

vehiculares que se cruzan. Las intersecciones a nivel no distribuyen al flujo vehicular en diferentes niveles y, por tanto, se presentan conflictos entre los flujos vehiculares que se cruzan.

En la figura 4.1 se muestran diferentes tipos de intersecciones a desnivel.

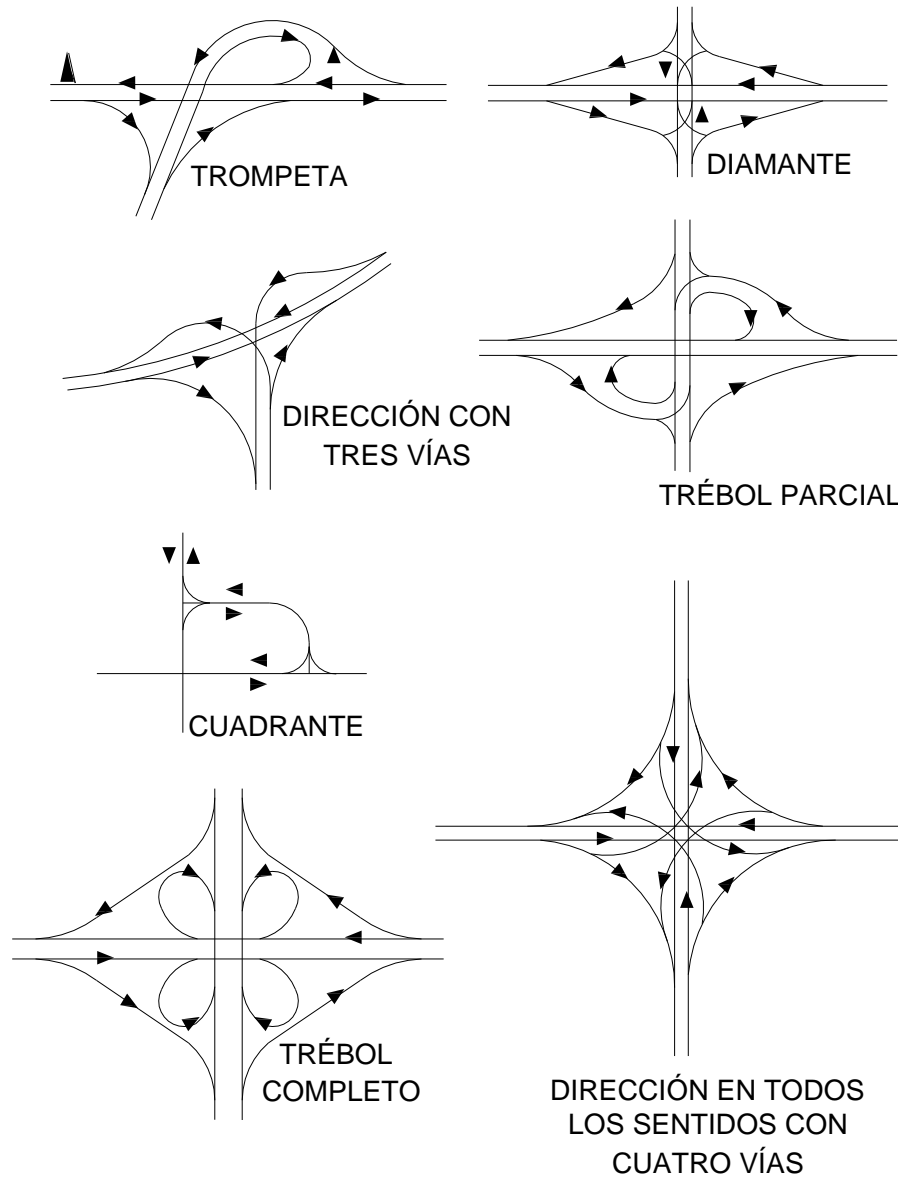


Figura 4.1 Intersecciones a desnivel.
Fuente: Ingeniería de Tránsito y Carreteras (J. Garber & A. Hoel, 2005)

4.2.2 Intersecciones a nivel

Los tipos básicos de intersecciones a nivel son de tipo T o de tres vías, que contemplan tres enfoques; las intersecciones de cuatro vías o tréboles, que tienen cuatro accesos; y las intersecciones de vías múltiples, que tienen cinco o más accesos.

En la figura 4.2 se muestran diferentes tipos de intersecciones a nivel.

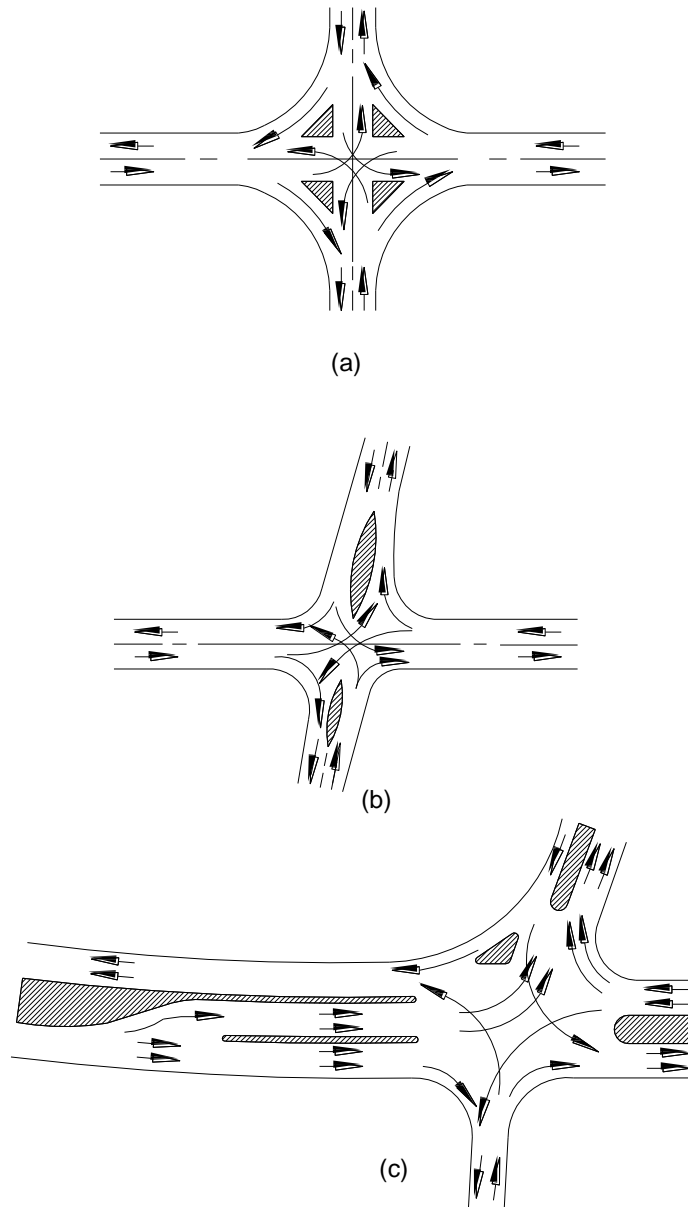


Figura 4.2 Intersecciones a nivel.

Fuente: Ingeniería de Tránsito y Carreteras (J. Garber & A. Hoel, 2005)

4.2.3 Intersecciones tipo T

En la figura 4.3 se muestran diferentes tipos de intersecciones en T, que varían de la más simple, a aquella que tiene diferentes carriles con camellones y carriles para dar vuelta. La construcción de varios carriles, contempla el suministro de instalaciones tales como, las marcas en el pavimento y os camellones para regular y encauzar los flujos vehiculares que entran en conflicto para que sigan las trayectorias específicas de viaje.

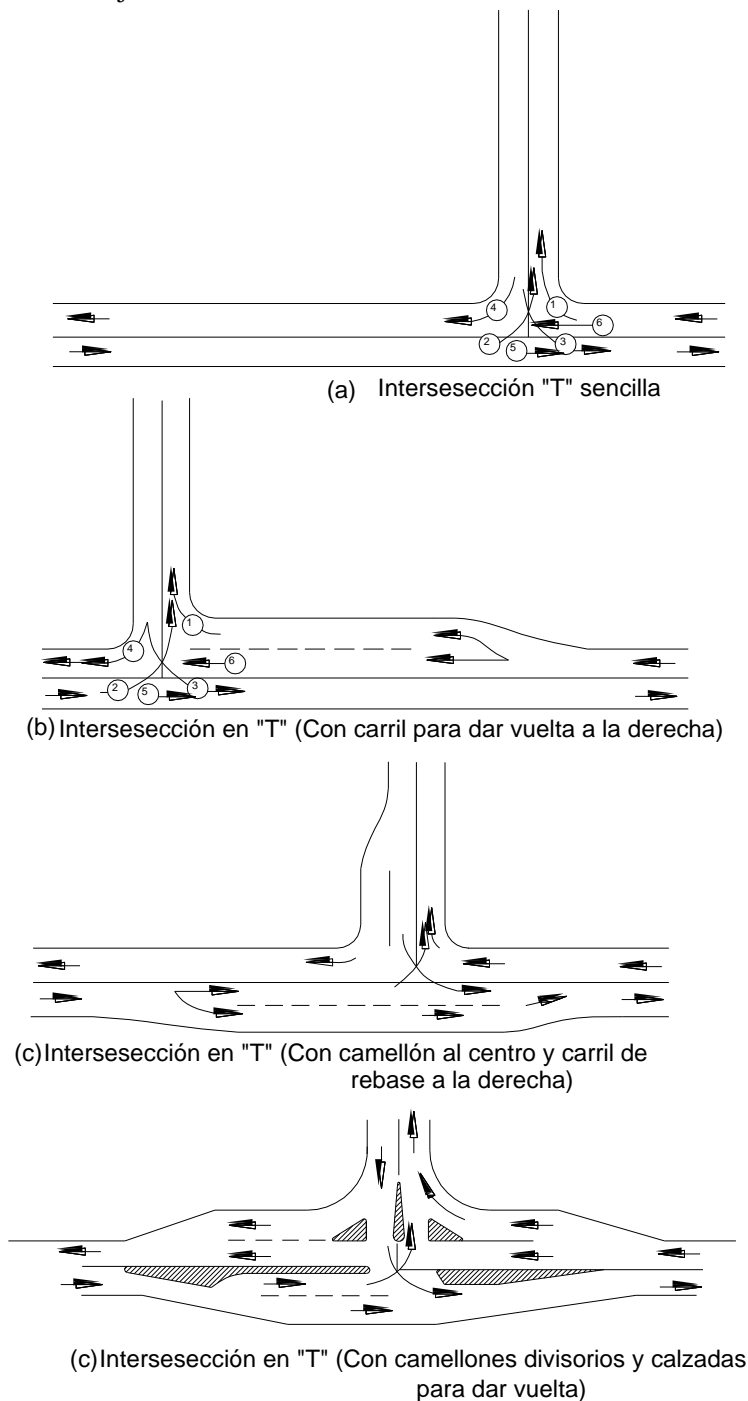


Figura 4.3 Intersecciones a tipo "T".

Fuente: Ingeniería de Tránsito y Carreteras (J. Garber & A. Hoel, 2005)

4.2.4 Intersecciones de cuatro vías o tréboles

En la figura 4.4 se muestran diferentes niveles de número de carriles para una intersección de cuatro vías. La intersección de un solo carril se usa principalmente en localidades de cruce con caminos secundarios locales, también puede usarse para el cruce de un camino secundario con una carretera principal. En estos casos los volúmenes que dan vuelta, generalmente son bajos y los caminos se cruzan en un ángulo que no es mayor de 30 grados respecto de la normal. Cuando los movimientos de vuelta son frecuentes, pueden construirse carriles continuos de vuelta a la derecha. El diseño mostrado en la figura c es adecuado para una carretera de dos sentidos que no sea una intersección secundaria y que conduce volúmenes moderados a altas velocidades o que opera cerca de la capacidad total. En la figura d, se muestra un diseño adecuado para cuatro accesos y cuatro carriles, que conducen volúmenes elevados de paso y que dan vuelta. Generalmente este tipo de intersecciones están señalizadas.

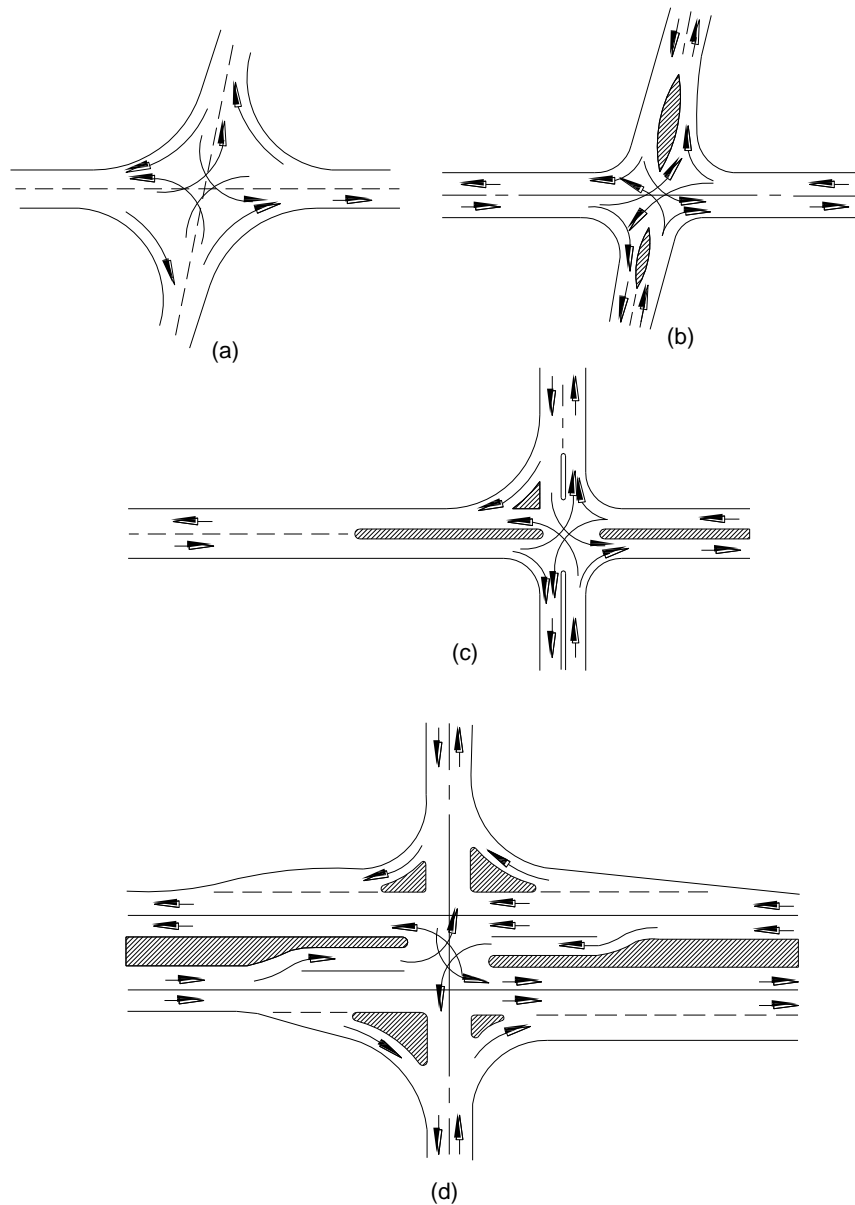


Figura 4.4 Diferentes niveles de trazado de carriles en intersecciones de cuatro vías.

Fuente: Ingeniería de Tránsito y Carreteras (J. Garber & A. Hoel, 2005)

4.2.5 Intersecciones de vías múltiples

Las intersecciones de vías múltiples tienen cinco o más accesos. Siempre que sea posible, debe evitarse este tipo de intersecciones. Con objeto de eliminar algunos de los movimientos conflictivos en las intersecciones principales y con ello aumentar la seguridad y la operación, se realinean una o más vías.

4.3 Canalización de intersecciones

En función de la intensidad de tráfico y por tanto, de la capacidad que se pretenda conseguir, se distinguen dos tipos principales de intersecciones: canalizadas y sin canalizar. Las primeras, debido a la delimitación de las trayectorias conseguida mediante isletas, lágrimas y dispositivos similares, tienen mayor capacidad que las segundas.

La Instrucción de Carreteras exige la canalización de intersecciones cuyos ramales tengan una IMD (intensidad media diaria) igual o superior a 300 vehículos por día.

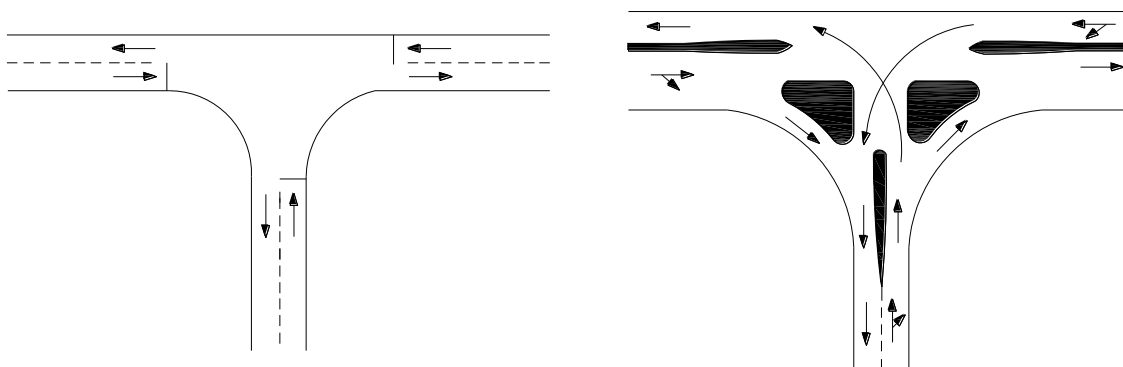


Figura 4.5 Intersecciones sin canalizar y canalizada.

Fuente: Ingeniería de Tránsito y Carreteras (J. Garber & A. Hoel, 2005)

4.4 Tipología de intersecciones

Aunque la variedad de intersecciones que pueden proyectarse es casi ilimitada, puede establecerse una tipología de las mismas en función del número de vías o ramales que concurren. Dentro de algunos de estos grupos, pueden distinguirse dos subgrupos en función de la disposición geométrica que adoptan los ramales. En la siguiente tabla, se muestra un resumen tipológico de las mismas.

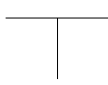
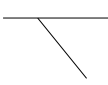


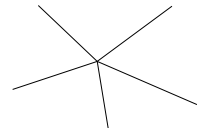
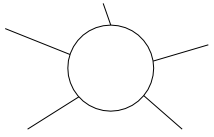
	Perpendiculares	Oblicuas
Tres Ramales	 En T	 En Y
Cuatro Ramales	 En cruz	 En X
Múltiple		
Giratoria		

Figura 4.6 Tipología de intersecciones.
Fuente: Ingeniería de Tránsito y Carreteras (J. Garber & A. Hoel, 2005)

4.4.1 Intersecciones de tres ramales

Este tipo de intersecciones se emplean para la resolución de encuentros entre carreteras principales y secundarias, quedando estas últimas absorbidas por las primeras. Por su disposición geométrica en planta, se diferencian claramente dos tipos:

- Intersecciones en T: Los ramales concurren formando ángulos mayores de 60° , es decir, con direcciones sensiblemente perpendiculares.
- Intersecciones en Y: Al menos uno de los ángulos formados entre los ramales es menor de 60° .

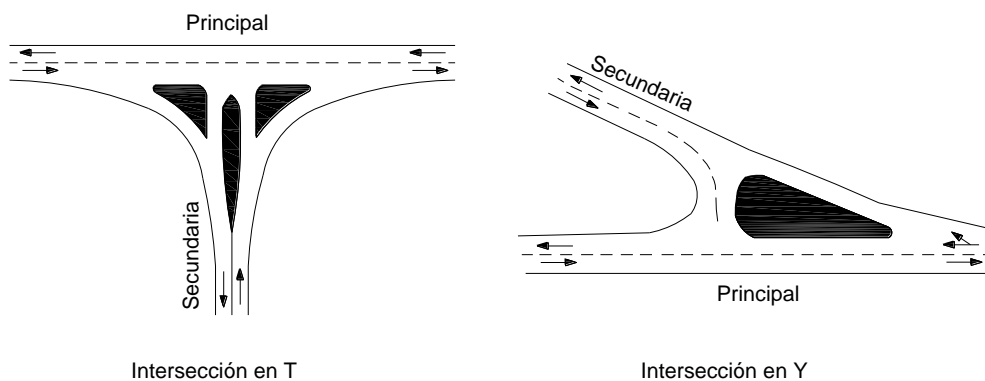


Figura 4.7 Intersecciones de tres ramales.
Fuente: Ingeniería de Tránsito y Carreteras (J. Garber & A. Hoel, 2005)

En un principio, las intersecciones en T son más recomendables, al concurrir perpendicularmente las vías, lo que aumenta la visibilidad en el cruce; por otro lado, la intersección en Y facilita determinados movimientos principales, aunque debe procurarse que si la intersección se produce una curva de la carretera principal, la alineación de la carretera secundaria no quede tangente a ella para evitar confusión. Aun así, es desaconsejable el proyecto de intersecciones en Y, salvo en circunstancias excepcionales.

Conforme aumenta el tamaño de los radios de giro utilizados, aumenta la superficie del área pavimentada, lo que puede producir confusiones y dudas entre los conductores respecto de qué trayectoria seguir. Esto se evita canalizando la intersección mediante isletas alargadas o lágrimas e isletas de tipo triangular.

Para favorecer determinados movimientos pueden construirse raquetas o carriles independientes que facilitan la incorporación del vehículo mediante un giro indirecto, así como intersecciones en T con falsa glorieta. Aunque en algunos casos resulten más económicas, no son recomendables, ya que se realice perpendicularmente a los mismos. Únicamente, este tipo de variantes pueden considerarse si se hallan reguladas mediante semáforos.

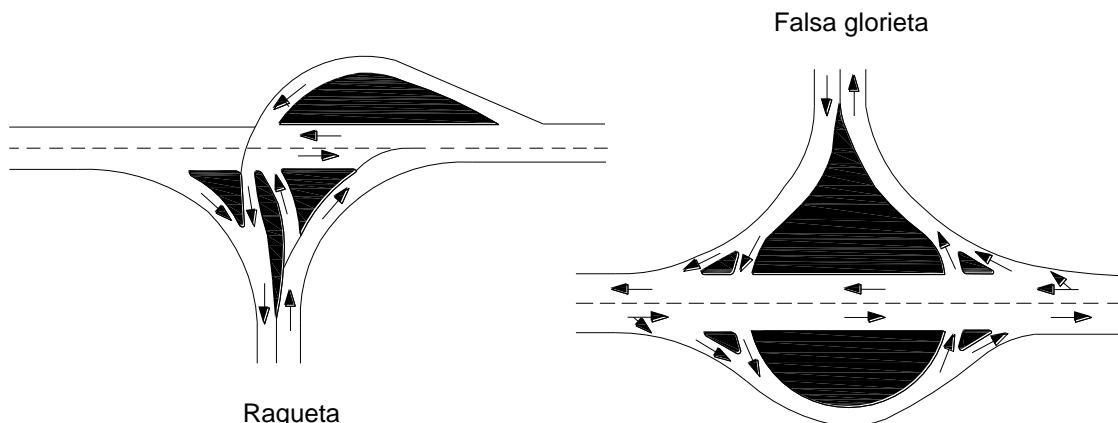
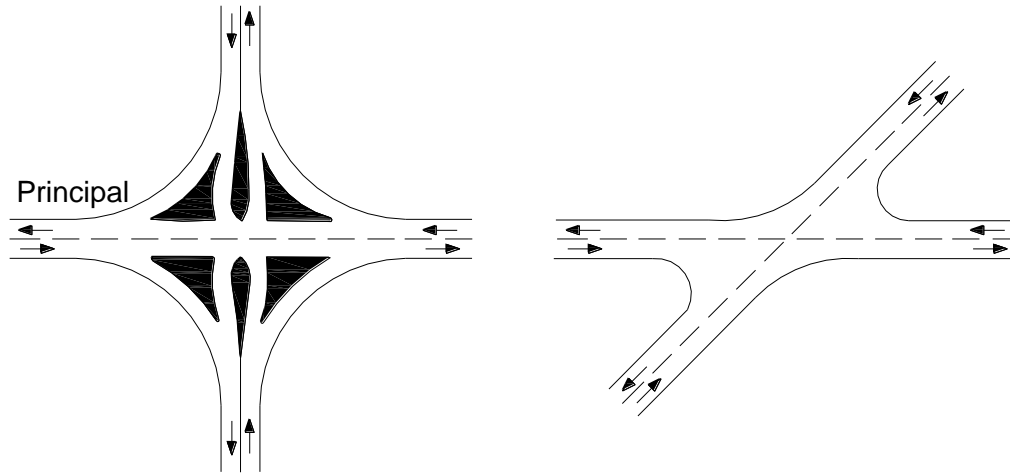


Figura 4.8 Variantes en raqueta y rotonda o falsa glorieta.
Fuente: Ingeniería de Tránsito y Carreteras (J. Garber & A. Hoel, 2005)

4.4.2 Intersecciones de cuatro ramales

En ellas se produce un cruce de dos vías, cuatro ramales en total, generalmente de rango similar. Al igual que en las anteriores, se distinguen dos tipos:

- Intersecciones en cruz: Los ramales concurren formando en cualquier caso ángulos mayores de 60° , con direcciones sensiblemente perpendiculares.
- Intersecciones en X: Los ramales forman dos ángulos menores de 60° .



Intersección en cruz

Intersección en x

Figura 4.9 Intersecciones de cuatro ramales.

Fuente: Ingeniería de Tránsito y Carreteras (J. Garber & A. Hoel, 2005)

Las intersecciones poco importantes pueden mantenerse sin canalizar; según vaya aumentando el tráfico será conveniente colocar isletas o vías de espera tanto en la vía principal como en la secundaria.

Al igual que en intersecciones de tres ramales, cuando el tráfico en la vía principal tiende a no desviarse de dicha vía puede ser conveniente el proyecto de intersecciones con falsa glorieta, aunque en este caso dada su mayor peligrosidad conviene que estén semaforizadas.

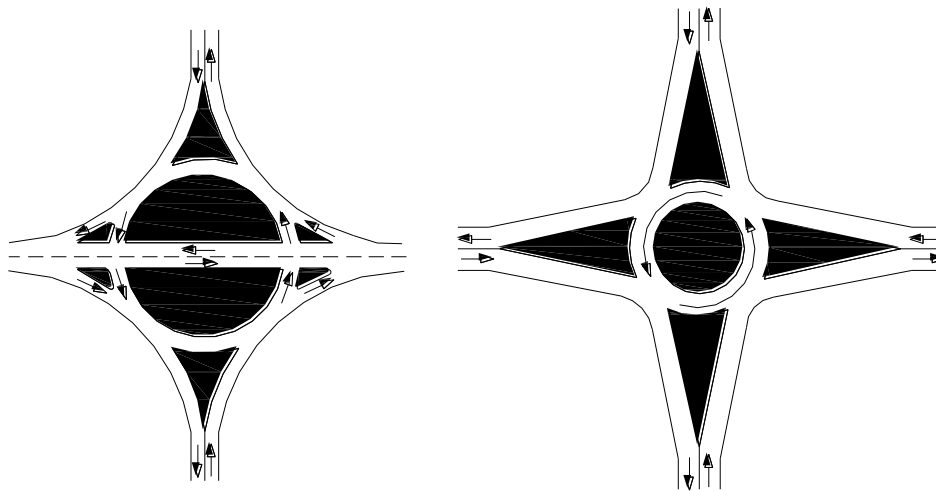


Figura 4.10 Falsas glorietas.

Fuente: Ingeniería de Tránsito y Carreteras (J. Garber & A. Hoel, 2005)

Las intersecciones en X proporcionan una mala visibilidad de la calzada, por lo que es conveniente transformarlas en intersecciones en cruz o en doble T, como se muestra en las figuras adjuntas.

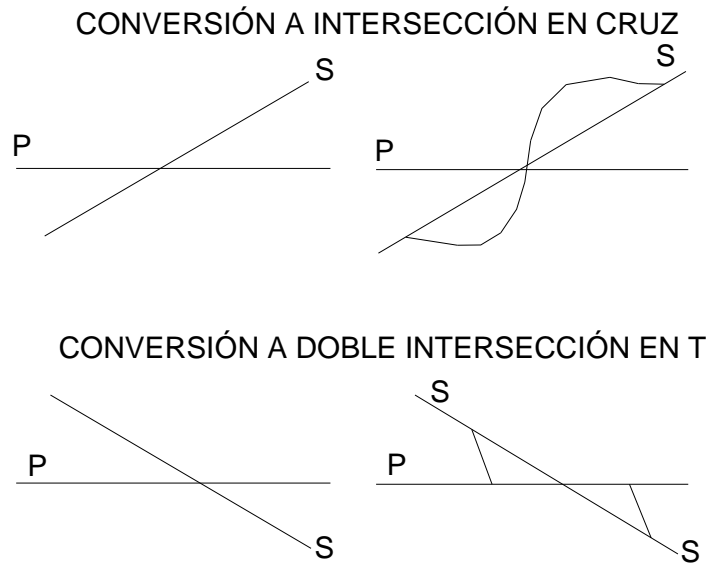


Figura 4.11 Formas correctas de convertir intersecciones en X.
Fuente: Ingeniería de Tránsito y Carreteras (J. Garber & A. Hoel, 2005)

4.5 Puntos de conflicto en las intersecciones

Se presentan conflictos cuando los flujos vehiculares que se mueven en diferentes direcciones interfieren entre sí. Los tres tipos de conflictos son incorporación, salida y cruce. El número de posibles puntos de conflicto en una intersección depende del número de accesos, de los movimientos para dar vuelta y del tipo de control de tránsito en la misma.

El objetivo primario en el diseño de un sistema de control de tránsito en una intersección, es reducir el número de puntos importantes de conflicto. Para el diseño de un sistema así, primero es necesario llevar a cabo un análisis de los movimientos de dar vuelta en la intersección que indicará el tipo relevante de conflictos. Los factores que influyen en la relevancia de un conflicto incluyen el tipo de conflicto, número de vehículos en cada uno de los flujos conflictivos y velocidad de los vehículos en estos flujos. Sin embargo, los conflictos de cruce tienden a tener el efecto más severo en el flujo vehicular y deben reducirse a un mínimo siempre que sea posible.

4.6 Ventajas e inconvenientes de intersecciones

Las intersecciones a nivel presentan algunas ventajas e inconvenientes, las cuales son:

- *Ventajas:*
Mayor facilidad de proyecto y construcción.
Requiere una menor superficie.
Generalmente son más económicas.
- *Desventajas:*
Menor capacidad de tránsito.

Obligan a reducir la velocidad e incluso parar.
Condicionadas por la visibilidad.

Los factores a considerar de cara al diseño de una intersección son los siguientes:

-Datos funcionales:

Debe estudiarse el tipo y rango de las vías que concurren, dando una mayor preferencia a aquella que mayor tráfico posea.

-Datos físicos:

Topografía y en su caso disposición urbana de la zona apuntando las posibles barreras existentes para extender la superficie, así como los distintos servicios urbanos que discurren por el subsuelo. Para ello es necesario disponer de una planta y de los perfiles longitudinales de las carreteras que se cruzan, así como de cuantos datos sean necesarios.

-Datos tránsito:

Se debe efectuar un análisis tanto cuantitativo, conociendo las intensidades de tránsito en cada vía, como cualitativo, estudiando la composición de dicho tránsito. También es importante tener en cuenta la velocidad en los accesos y los movimientos locales.

-Accidentes:

La repetición de accidentes en una intersección se puede justificar su acondicionamiento; por ello, es interesante conocer la forma en que se producen los accidentes, así como las causas que los determinan.

4.7 Criterios de proyecto

Los principios generales que deben regular el proyecto de una intersección, especialmente si ésta es canalizada, son los siguientes:

-Preferencia de los movimientos principales:

Los movimientos principales generalmente aquellos que impliquen un mayor número de vehículos deben prevalecer sobre los secundarios, limitando estos últimos con diversos métodos: señalización, reducción del ancho o radios pequeños.

-Reducción de las áreas de conflicto:

Las grandes superficies, o lo que es igual, la escasa o inexistente definición de las trayectorias a seguir en cada posible movimiento genera comportamientos desordenados y confusión, aumentando la accidentalidad de la intersección.

-Perpendicularidad de las trayectorias:

Las intersecciones en ángulo recto son las que representan áreas de conflicto mínimas. Además, facilitan las maniobras, aumentan la visibilidad en la intersección y reducen tanto la accidentalidad como la gravedad de los accidentes producidos. Son aceptables ángulos comprendidos entre 60° y 120°.

-Paralelismo de las trayectorias al converger o divergir:

Los vehículos que se incorporen o salgan de una vía deberán hacerlo con ángulos de entre 10° y 15°, para de este modo aumentar la fluidez de la circulación. Ángulos mayores provocarán detenciones, disminuyendo ostensiblemente la capacidad y la seguridad en la intersección.

-Control de los puntos de giro:

Una canalización adecuada permite evitar giros en puntos no convenientes, mediante el empleo de isletas que los hagan materialmente imposibles o muy difíciles. Si las isletas están elevadas, la seguridad será mayor que si se delimitan con marcas en el pavimento de la vía.

-Control de la velocidad:

Para evitar accidentes, puede ser conveniente limitar la velocidad máxima en la intersección, disponiendo para ello curvas de menor radio o estrechando las calzadas.

-Visibilidad:

La velocidad debe regularse en función de la visibilidad, de forma que entre el punto en que un conductor pueda ver a otro vehículo con preferencia de paso exista, al menos, la distancia de parada.

-Sencillez y claridad:

Las intersecciones excesivamente complicadas crean en el conductor un estado de duda y confusión, lo que provocará que cometa errores en la elección de la trayectoria e intente rectificarla, aumentando el riesgo de accidentes.

-Comodidad:

El conductor debe poder abordar cualquier trayectoria posible sin efectuar maniobras incómodas o recorridos demasiado largos; el confort deriva en una mayor fluidez en el tráfico.

-Previsión de crecimiento:

Debe preverse la demanda futura de tráfico en la intersección, para evitar que quede obsoleta en un corto periodo de tiempo.

-Otros aspectos:

En situaciones más particulares, puede ser necesario considerar una serie de factores, como son: separación de los puntos de conflicto, separación de determinados movimientos, creación de zonas protegidas para peatones, etc.

Capítulo 5.
ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y
NIVEL DE SERVICIO EN
INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

5. ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y NIVEL DE SERVICIO EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS

El nivel de servicio de cualquier intersección en una vía tiene un efecto importante sobre su desempeño general operativo. Una mejora en el nivel de servicio de cada intersección determinada, conlleva a mejores resultados en el desempeño operativo general de la vía. Un procedimiento de análisis que permita la determinación de la capacidad o del nivel de servicio en las intersecciones, es una herramienta importante para los diseñadores, el personal de operación y los responsables de las políticas. Los factores que afectan el nivel de servicio en las intersecciones, tienen en cuenta el flujo y la distribución del tránsito, las características geométricas y el sistema de señalización.

Es necesario definir algunos términos que se utilizarán en este capítulo para entender su uso.

-Movimientos permitidos de giro:

Los movimientos permitidos de giro o vueltas permitidas son aquellos que se realizan aprovechando las brechas de un flujo vehicular en sentido contrario o atravesando un flujo de peatones en conflicto. Por ejemplo, cuando se realiza una vuelta a la derecha, mientras que los peatones en conflicto están atravesando el cruce peatonal, la maniobra de giro a la derecha es un movimiento de vuelta permitida. En forma similar, cuando se realiza una vuelta a la izquierda entre dos vehículos consecutivos de flujo vehicular en sentido contrario, la maniobra de giro a la izquierda es una vuelta permitida. La instalación de las vueltas permitidas en una intersección dada, depende de las características geométricas de la intersección, del volumen de la maniobra de giro, y del volumen en sentido contrario.

-Giros protegidos:

Son aquellas vueltas protegidas que se dan entre flujos opuestos de vehículos o peatones en un cruce peatonal en conflicto. Una vuelta permitida toma más tiempo que una vuelta protegida similar y utilizará más del tiempo disponible de luz verde.

-Intervalo de cambio y de despeje:

Es la suma de los intervalos “ámbar” y “todo rojo” (dados en segundos) que se dan entre las fases para permitir que el tránsito de vehículos y de peatones salga de la intersección antes de liberar los movimientos en conflicto.

-Condiciones geométricas:

Es un término que se usa para describir las características de las vías de acceso. Éstas incluyen el número y ancho de los carriles, las pendientes, y la ubicación de los carriles para diferentes usos, como la designación de un carril de estacionamiento.

-Condiciones de señalización:

Es un término que se usa para describir los detalles de la operación del semáforo. Éstos incluyen el tipo de control del semáforo, la secuencia de fases, los tiempos de fases, y el avance de las señales en cada caso.

-Grupo de carriles:

Un grupo de carriles consta de uno o más carriles que tienen una línea de alto común, llevan un conjunto de flujos vehiculares, y cuya capacidad es compartida por todos los vehículos del grupo.

5.1 Introducción al Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000)

El Manual de Capacidad de Carreteras es una publicación de Transportation Research Board (TRB) en los Estados Unidos. Contiene conceptos, directrices y procedimientos de cálculo para la capacidad y nivel de servicio en las carreteras.

El manual tiene como intención proveer una base sistemática y congruente para el establecimiento de los valores estimados de la Capacidad y los Niveles de Servicio del sistema de transporte terrestre. Dichos parámetros y métodos han sido establecidos a partir de una gama amplia de estudios e investigaciones llevados a cabo durante los últimos cincuenta años en los que se reflejan condiciones promedio de circulación en los EE. UU. De manera que al hacer uso del HCM 2000 debe tenerse en cuenta que la mayoría de los datos de investigación provienen particularmente de valores por defecto y aplicaciones para los EE.UU.

Con base en los métodos presentados en el Manual de Capacidad de Carreteras se requiere destacar la calibración de las ecuaciones, respecto a las condiciones locales, se consideran las diferencias más importantes de las condiciones del tránsito, condiciones geométricas y de dispositivos de control.

El Manual de Capacidad de Carreteras ha sido modificado en diversas ocasiones, se han mejorado sus versiones y se ha ajustado a la demanda de los usuarios del transporte.

Durante el periodo de 1930- 1940, cuando la ingeniería de tránsito se consolidaba, existía una gran inquietud por cuantificar el diseño de las vías con respecto al tránsito que iban a servir, y de cierto modo, convertir a la ingeniería de tránsito en una verdadera técnica.

La demanda de tránsito, expresada en volumen, debía satisfacerse con una oferta de tránsito expresada también en volumen, que se llamaría capacidad vial. Entonces sería factible diseñar los elementos geométricos y de regulación de la circulación a fin de proporcionar una capacidad, en vehículos por hora, superior a los vehículos por hora que se estimara pasarían por la vía en el año de diseño y evitar que ocurriera la temida congestión del tránsito.

Existían diversos procedimientos teóricos que estimaban la capacidad vial basados en principios racionales, pero el fenómeno comprendía tantas variables desconocidas (especialmente a lo que se refiere a las reacciones humanas) que se pensó que lo más práctico sería elaborar un procedimiento basado en su mayoría por datos tomados en el terreno que establecieran relaciones empíricas entre las características del tránsito y las vías, y la capacidad de éstas.

En los Estados Unidos, la tarea de crear ese procedimiento fue acometida por el “Bureau of Public Roads” (que hoy se llama “Federal Highway Administration”) y fue dirigida por el ingeniero Olav Koch Normann. El fruto de su labor fue la primera edición del HCM en 1950, siendo el primer documento en cuantificar el concepto de capacidad para medios de transporte.

El HCM fue un éxito de librería y se tradujo a los principales idiomas del mundo inclusive al castellano. En 1965 El Consejo para la Investigación del Transporte TRB, publicó la segunda edición, bajo la guía de su Comité de la Capacidad de Carreteras, fue la primera en definir el concepto de nivel de servicio que se ha vuelto la base para determinar la suficiencia de las facilidades de transporte desde la perspectiva de planificación, diseño y operación.

En mil novecientos ochenta y cinco, la TRB publicó la tercera edición, la cual reflejó más de dos décadas de investigación comprensiva conducida por una variedad de agencias bajo el patrocinio de varias organizaciones, principalmente, El Programa Nacional de Cooperativa de Investigación de Carreteras y la Administración de Carreteras Federales. Como un resultado continuo de investigación

acerca de la capacidad, se puso al día la tercera edición del HCM en 1994 y 1997. La actualización de 1997 incluye revisiones extensivas. Se proyecta una edición completamente nueva para el sugestivo año 2000.

Paralelamente a la preparación del HCM se han ido elaborando programas informáticos que realizan automáticamente los procedimientos que se van plasmando en el HCM. Estos programas proceden de distintas fuentes, pero los más populares son los llamados HCS (“Highway Capacity Software”) que difunde el Centro McTrans de la Universidad de Florida en los Estados Unidos.

Los programas HCS replican fielmente los procedimientos del HCM en el computador y resuelven los problemas en una pequeña fracción del tiempo que requiere su solución manual utilizando los formatos y tablas del HCM.

Sin embargo, cualquier programa HCS que resuelve de manera mecánica un problema de tránsito, no permite a quién los use comprender los procesos de automatización del mismo, por lo que es de suma importancia dominar los métodos manuales antes de utilizar los métodos computarizados.

La versión del HCM 2000, como las anteriores versiones, sigue la filosofía original ante el problema de definir analíticamente el complejo fenómeno del tránsito vial, se optó por definir primero las condiciones más ideales que fuera posible (carriles de 3.66 m, rasante horizontal, alineamiento recto, ausencia de vehículos pesados, etc.) y luego aplicar a ella factores de corrección o ajuste que representaran qué tanto se apartan las condiciones reales de las ideales. La pauta para definir las condiciones ideales fue el punto a partir del cual, una mejora de cualquier naturaleza de esas condiciones no se reflejara en ni en un aumento de la capacidad ni en una elevación del nivel de servicio.

La aplicación del HCM contempla tres niveles de aplicación:

- **Análisis de circulación:** Es la aplicación que requiere mayor precisión y se basa en datos actuales sobre tránsito, vía y regulación. Se deben conocer las condiciones presentes en la vía, para poder extrapolar valores del parámetro que se han medido. También se puede medir una variable a lo largo de una vía con un vehículo en movimiento, tal como la velocidad a flujo libre, y utilizar el manual para inferir el nivel de servicio a partir de esa información y de otros datos aislados que se tenga.
- **Diseño o proyecto:** Cuando se diseña una vía, o elementos permanentes de ella que requieran grandes inversiones, se debe garantizar que su utilidad vaya a durar bastante tiempo. Entonces es preciso predecir cuál va a ser la demanda de tránsito en el año para el que se proyecta a fin de satisfacer esa demanda razonablemente.
- **Planeación:** Esta aplicación se hace generalmente cuando se empieza a planear una vía o un sistema vial y todavía no se conocen con exactitud todos los detalles necesarios. El manual norteamericano proporciona procedimientos de planeación que son menos complicados que los que se aplican para diseño o análisis de circulación, a fin de evitar el uso de refinamientos innecesarios en trabajos de planeamiento preliminar.

Finalmente, es importante mencionar que ya fue presentada la nueva versión del Highway Capacity Manual HCM 2010, en la cual se presentan algunas mejoras, por ejemplo, el capítulo de tránsito fue removido porque el Manual de Capacidad de Tránsito y Calidad de Servicio, segunda edición (TCRP 100) existe. Además, el material de los peatones y ciclistas se trasladaron a los capítulos en los que tienen un impacto en las operaciones.

El capítulo Conceptos proporciona material de introducción y resumen para el Manual en su conjunto. El volumen será una discusión de la percepción del viajero, que contrasta frente a las medidas operativas de satisfacción para múltiples modos en las calles urbanas. Este material fue desarrollado bajo el proyecto NCHRP 3-70, *Análisis Multimodal de Nivel de Servicio para Calles Urbanas*. También presenta una guía general sobre el uso de alternativas para el HCM.

El volumen de flujo continuo direcciona autopistas, autopistas multicarril y autopistas de dos carriles. Los principales cambios son una definición de Nivel de Servicio para autopistas, un nuevo capítulo de trenzado, y la eliminación de la metodología de análisis para autopistas de dos carriles.

El flujo interrumpido direcciones intersecciones (señalizaciones, controles de alto, glorietas), calles urbanas e intercambios de terminales de rampa. La investigación de la percepción de viajeros se incorporará en el capítulo de instalaciones de calles urbanas, junto con el material desarrollado en NCHRP 3-79, *la Mediación y Predicción de la Presentación de tráfico de Automóviles en Calles Urbanas*. En el capítulo de intersecciones semaforizadas, la actual ecuación basada en determinación de retardo uniforme y colas se reemplazará por un enfoque basado en el análisis de incremento de colas. Además, el capítulo de intercambios de terminales de rampas será reemplazado con el trabajo desarrollado por NCHRP 3-60, *Capacidad y Calidad del Nivel de Servicio de Intercambios de Terminales de Rampa*.

Para este análisis, se usará como base el flujo interrumpido, usado para el tránsito urbano. Mediante la Metodología de análisis operacional (HCM 2000).

5.2 Capacidad en intersecciones con semáforos

La capacidad en una intersección señalizada, está dada por cada grupo de carriles y se define como la tasa máxima de flujo que puede cruzar la intersección, por cada grupo de carriles que se considera, de acuerdo con las condiciones prevalecientes de tránsito, de la vía y de la señalización. La capacidad se da en vehículos por hora (veh/h), pero se basa en el flujo durante un período pico de 15 minutos. No se considera la capacidad de toda la intersección; en lugar de ello, se enfatiza en el suministro de las instalaciones. Por tanto, la capacidad se aplica solamente a los movimientos o accesos principales de la intersección.

Las condiciones prevalecientes del tránsito incluyen los volúmenes por tipo de movimiento (izquierda, directo, derecho), su composición vehicular (automóviles, autobuses, camiones), maniobras de estacionamiento, conflictos peatonales y paradas de autobuses. Las condiciones prevalecientes de la calle describen las características geométricas de los accesos en términos de número y ancho de carriles, pendientes y uso de carriles incluyendo carriles de estacionamiento. Las condiciones prevalecientes del semáforo incluyen la secuencia de fases, asignación de tiempos y el tipo de operación o control.

El procedimiento seguido para el análisis de capacidad, se puede resumir en una comparación entre la *demanda* y la *oferta* para cada grupo de carriles. La demanda está representada por la cantidad de vehículos que utilizan los diferentes accesos (volumen), mientras que la oferta esta simbolizada por la capacidad (c). Normalmente, los resultados del análisis de capacidad se expresan en ratios de “volumen/capacidad” (V/c). Un valor cercano a cero indica situaciones de poca demanda, con condiciones muy favorables de circulación, mientras que valores mayores a 0.9 indican situaciones congestionadas con posible presencia de colas estacionarias.

La información de la demanda se consigue a través de aforos, realizados en los accesos de la intersección para un período de tiempo definido, y la capacidad es obtenida mediante el uso del flujo de saturación base, factores de corrección y la proporción de verde efectivo.

Para determinar la capacidad de un grupo de carriles se usa el concepto de flujo de saturación s_i . Se define como la tasa máxima de flujo, en un acceso o grupo de carriles, que puede pasar a través de la intersección bajo las condiciones prevalecientes del tránsito y la calle, suponiendo que dicho acceso o grupo de carriles tiene el 100% del tiempo disponible como verde efectivo. Se expresa en vehículos por hora de luz verde (veh/h). Por lo tanto, la capacidad para un acceso o grupo de carriles se define por:

$$c_i = s_i(g_i/C) \quad (5.1)$$

Donde:

c_i = capacidad del acceso o grupo de carriles i (v/h)
 s_i = flujo de saturación del acceso o grupo de carriles i (veh/h)
 g_i = tiempo verde efectivo para el acceso o grupo de carriles i (s)
 C = ciclo del semáforo (s)
 g_i/C = relación de verde para el acceso o grupo de carriles i

Para un acceso o grupo de carriles i , a la relación $(v/c)_i$ se le llama grado de saturación X_i , y se determina como:

$$X_i = \left(\frac{v}{c}\right)_i = \frac{v_i}{s_i\left(\frac{g_i}{C}\right)} = \frac{v_i C}{s_i g_i} \quad (5.2)$$

Donde:

X_i = grado de saturación
 v_i = tasa de flujo para la demanda actual o proyectada para un acceso o grupo de carriles (veh/h)
 s_i = flujo de saturación del acceso o grupo de carriles i (veh/h)
 g_i = tiempo verde efectivo para el acceso o grupo de carriles i (s)
 C = ciclo del semáforo (s)

Cuando la tasa de flujo es igual a la capacidad, el *grado de saturación* X_i es igual a 1.00, y cuando la tasa de flujo es cero, X_i es igual a cero. Valores por arriba de un grado de saturación de 1.00 indican un exceso de demanda sobre la capacidad.

Para evaluar globalmente la intersección, con respecto a su geometría y al ciclo, se utiliza el concepto de *grado de saturación crítico* de la intersección X_c . Considera solamente los accesos o grupos de carriles críticos, definidos como aquellos que tienen la relación de flujo más alta para cada fase, $(v/s)_{ci}$. Se define como:

$$X_c = \sum \left(\frac{v}{s}\right)_{ci} \left(\frac{C}{C-L}\right) \quad (5.3)$$

Donde:

X_c = grado de saturación crítico
 $\sum \left(\frac{v}{s}\right)_{ci}$ = suma de las relaciones de flujo de todos los accesos o grupos de carriles críticos i
 C = ciclo del semáforo (s)
 L = tiempo total perdido por ciclo (s)

5.3 Niveles de servicio en intersecciones con semáforos

Los procedimientos pueden usarse ya sea para una evaluación detallada u operativa de una intersección o para una estimación general de planificación del desempeño general de una intersección señalizada existente o planificada. Para el análisis a nivel de diseño, se requieren más datos para una estimación directa a nivel de servicio que se quiere dar. Para este nivel de análisis también es posible determinar el efecto de modificar los tiempos de las fases del semáforo.

El nivel de servicio en una intersección con semáforo se define a través de las demoras, las cuales representan para el usuario una medida del tiempo perdido de viaje, del consumo de combustible, de la incomodidad y de la frustración.

El Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000) define los seis niveles de servicio de la siguiente manera:

Tabla 5.1 Descripción de los niveles de servicio en intersecciones con semáforo

Nivel de servicio	Demora	Características de la operación
	(s/veh)	
A	≤ 10	Baja demora, sincronía muy favorable y ciclos cortos. Los vehículos no se detienen.
B	De 10 a 20	Ocurre con buena sincronía y ciclos cortos. Los vehículos empiezan a detenerse.
C	De 20 a 35	Ocurre con una sincronía regular y/o ciclos largos, los ciclos individuales empiezan a fallar.
D	De 35 a 55	Empieza a notarse la influencia de congestionamientos, ocasionados por un ciclo largo y/o una sincronía desfavorable o relaciones v/c altas, muchos vehículos se detienen.
E	De 55 a 80	Empieza el límite aceptable de la demora. Indica una sincronía muy pobre, grandes ciclos y relaciones v/c mayores, las fallas en los ciclos son frecuentes.
F	> 80	El tiempo de demora es inaceptable para la mayoría de los conductores, ocurren cuando los valores de flujos exceden la capacidad de la intersección o cuando hay relaciones v/c menores de 1.00 pero con una sincronía muy deficiente y/o ciclos demasiado largos.

Fuente: HCM (TRB, 2000)

5.4 Metodología de análisis operacional de intersecciones con semáforos (HCM 2000)

Mediante el análisis operacional se determina la capacidad y el nivel de servicio de cada grupo de carriles o acceso, lo mismo que el nivel de servicio de la intersección como un todo o globalmente. Como este análisis es bastante complejo, el procedimiento para simplificar las actividades a llevar a cabo se dividen en cinco módulos:

- 1- Módulo de entrada:
 - Condiciones geométricas.
 - Condiciones de tránsito.
 - Condiciones de los semáforos.

- 2- Módulo de ajuste de volúmenes:
 - Factor de la hora de máxima demanda.
 - Establecimiento de grupo de carriles.
 - Asignación de volúmenes a grupos de carriles.

- 3- Módulo de flujo de saturación:
 - Flujo de saturación ideal.
 - Ajustes.

- 4- Módulo de análisis de capacidad:
 - Cálculo de las capacidades por grupo de carriles.
 - Cálculo de la relación v/c por grupo de carriles.
 - Resultados agregados.

- 5- Módulo de nivel de servicio:
 - Cálculo de demoras por grupos de carriles.
 - Demoras agregadas.
 - Determinación del nivel de servicio.

En la figura 5.2, se muestran las entradas y los cálculos básicos del método, cuyo principal resultado es el nivel de servicio.

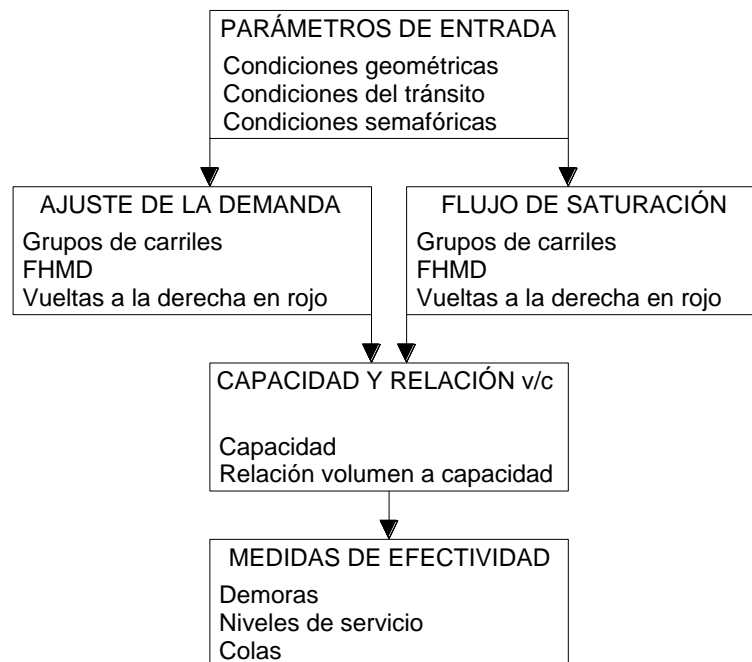


Figura 5.1 Esquema metodológico para el análisis de intersecciones semaforizadas.

Fuente: HCM (TRB, 2000)

A continuación se describen, en forma resumida, cada uno de los elementos necesarios para llevar a cabo la metodología.

5.4.1 Parámetros de entrada

La tabla 5.2 indica los principales datos necesarios para la aplicación de la metodología del análisis operacional del HCM 2000. Basado en tres categorías: condiciones geométricas, condiciones de tránsito y condiciones de señalización o semáforos:

Tabla 5.2 Datos empleados en el análisis operacional

Tipo de condición	Parámetro
Geométricas	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de área • Número de carriles, N • Ancho promedio de carriles, W (m) • Pendiente G (%) • Carriles exclusivos, LT o RT • Longitud de bahías, LT o línea RT, Ls (m) • Estacionamientos
Tránsito (circulación)	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda por movimiento, V (veh/h) • Flujo de saturación ideal, so (veh livianos/h/carril) • Factor horario de máxima demanda, FHMD (veh/h) • Porcentaje de vehículos pesados, HV (%) • Flujo peatonal en los accesos (peatones/h) • Autobuses que paran en la intersección, NB (autobuses/h) • Actividad de estacionamientos, Nm (maniobras/h) • Tipo de llegadas, AT • Proporción de vehículos que llegan en verde, P • Velocidad de aproximación, SA (km/h)
Semáforos	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud del ciclo, C (s) • Tiempo de verde, G (s) • Intervalo de cambio y despeje, entreverde, Y (s) • Operación accionada o prefijada • Botón peatonal • Verde mínimo peatonal, Gp (s) • Plan de fases • Período de análisis, T (h)

Fuente: HCM (TRB, 2000)

Condiciones geométricas: Las condiciones geométricas se refieren a la configuración física de la intersección en términos del número de carriles, movimientos por carril, ubicación de estacionamientos, longitudes de bahías para vueltas y pendientes de acceso.

Condiciones de tránsito: Para las condiciones del tránsito se debe disponer de los volúmenes de tránsito para cada movimiento en cada acceso y su composición en términos de automóviles, autobuses y camiones. Se debe considerar también el número de autobuses urbano que realizan paradas, antes y después de la intersección, para cargar y/o descargar pasajeros. Igualmente se deben aforar los flujos peatonales que entran en conflicto con los vehículos. Finalmente, se debe definir el tipo de llegadas a los accesos de la intersección, el cual indica el grado de progresión del flujo vehicular entre intersecciones.

La calidad de la progresión del flujo vehicular entre intersecciones se describe a través de seis tipos de llegadas a los accesos de la intersección, para cada grupo de carriles, así:

- Tipo 1: grupos densos que llegan al inicio del rojo. Calidad de progresión muy deficiente, como resultado de la optimización de toda la malla.
- Tipo 2: grupos moderados que llegan a la mitad del rojo. Progresión desfavorable en calles de doble sentido.
- Tipo 3: llegadas aleatorias. Representa la operación en intersecciones aisladas o no interconectadas, o donde los beneficios de la progresión son mínimos.
- Tipo 4: grupos moderados que llegan a la mitad del verde. Progresión favorable en calles de doble sentido.
- Tipo 5: grupos densos que llegan al inicio del verde. Calidad de progresión altamente favorable.
- Tipo 6: progresión excepcional. Grupos densos que progresan a través de varias intersecciones cortamente espaciadas.

El mejor tipo de llegada utilizado es el observado en campo, por lo tanto debe determinarse lo más preciso posible ya que éste tiene un impacto muy significativo para estimar la demora y el nivel de servicio. Aunque no hay parámetros definitivos para calificar en forma precisa el tipo de llegada, la siguiente relación puede ser así:

$$R_p = \frac{P}{g_i/C} \quad (5.4)$$

Donde:

R_p = relación de grupo de vehículos.

P = porcentaje de todos los vehículos en el movimiento de llegada durante la fase verde, obtenido en campo.

C = longitud del ciclo en segundos.

g = tiempo de verde.

Condiciones de los semáforos: Se refiere a la información del diagrama de fases que ilustre el plan de fases, longitud del ciclo, tiempos de verde e intervalos de cambio y despeje, para cada uno de los movimientos dados.

Si existen requerimientos de tiempo para los peatones, el tiempo mínimo de verde para una fase es:

$$G_p = 3.2 + \frac{L}{s_p} + \left(0.81 \frac{N_{ped}}{WE}\right) \quad \text{para } WE > 3.0 \text{ m} \quad (5.5)$$

$$G_p = 3.2 + \frac{L}{s_p} + (0.27N_{ped}) \quad \text{para } WE \leq 3.0 \text{ m} \quad (5.6)$$

Donde:

G_p = tiempo mínimo de verde (s)

L = longitud del cruce peatonal (m)

s_p = velocidad media del peatón (1.2 m/s)

WE = ancho del cruce peatonal (m)

N_{ped} = número de peatones que cruzan durante un intervalo (peatones)

Si las fases de semáforo son actuadas, la duración del ciclo y los tiempos de verde varían de ciclo a ciclo según la demanda. Para establecer los valores para el análisis, la operación del semáforo debe observarse en campo, utilizando valores promedio de los tiempos de verde y los ciclos.

5.4.2 Agrupación de carriles

Un grupo de carriles es un conjunto de carriles de un acceso que carga de un conjunto de flujos vehiculares. Se debe establecer en la intersección grupos de carriles apropiados, considerando tanto la geometría de la intersección como la distribución de los movimientos vehiculares. En general, deberán establecerse grupos de carriles separados, cuando se disponga de bahías exclusivas de vuelta a izquierda y ala derecha; los demás carriles directos se consideran en un grupo simple de carriles.

Cuando se tenga carriles de vuelta a izquierda compartidos, se deberá evaluar la operación en el carril compartido para determinar si efectivamente funciona como carril exclusivo de vuelta izquierda, debido a la presencia de altos volúmenes de vuelta a la izquierda. Para un acceso, cuando el flujo de vuelta a la izquierda en el carril de extremo izquierdo es menor que el flujo promedio en los demás carriles, se supone que los vehículos directos comparten el carril izquierdo y todo el acceso puede suponerse en un grupo de carriles simple. En caso de ser mayor, el carril exterior se debe designar como un carril exclusivo de vuelta a la izquierda en un grupo de carriles separado.

Matemáticamente esto se expresa así:

$$V_1 < \frac{V_a - V_l}{N-1} \quad (5.7)$$

$$V_1 \geq \frac{V_a - V_l}{N-1} \quad (5.8)$$

Donde:

V_l = volumen actual de vuelta a la izquierda (vehículos/h)

V_a = volumen actual en el acceso (vehículos/h)

N = número de carriles del acceso

Si se cumple la primera desigualdad, el carril extremo izquierdo es un carril compartido y se usa un solo grupo de carriles para todo el acceso. Si por el contrario, se cumple la segunda desigualdad, el carril extremo izquierdo actúa como un carril exclusivo de vuelta a la izquierda y, por lo tanto, deberá establecerse como un grupo separado de carriles.

5.4.3 Determinación de la tasa de flujo

Los volúmenes de demanda son mejor representados y proporcionados como una tasa de flujo (en vehículos por hora) durante el período de análisis. Aunque el período de análisis suele ser de 15 minutos, sin embargo, los volúmenes de demanda también pueden establecerse por un tiempo que abarca más de un período de análisis, tal como volumen por hora. En tales casos, los factores picos deben ser siempre convertidos a la demanda de la tasa de flujo para cada período particular en análisis.

Es necesario convertir los volúmenes horarios a tasas de flujo durante 15 minutos a través del factor de la hora de máxima demanda, así:

$$V_p = \frac{V}{FHMD} \quad (5.9)$$

Donde:

V_p = tasa de flujo durante el período de 15 minutos de máxima demanda (veh/h)

V = volumen horario (veh/h)

FHMD = factor de la hora de máxima demanda o factor de hora pico

5.4.4 Determinación de la tasa de flujo de saturación

La tasa de flujo de saturación se define como la tasa máxima de flujo, en un acceso o grupo de carriles, que puede pasar a través de la intersección bajo las condiciones prevalecientes del tránsito y la calle, suponiendo que dicho acceso o grupo de carriles tiene el 100% del tiempo disponible como verde efectivo (esto es, $g/C=1.0$).

Las condiciones prevalecientes del tránsito incluyen los volúmenes por tipo de movimiento (izquierda, directo, derecha), su composición vehicular (automóviles, autobuses, camiones), maniobras de estacionamiento, paradas de autobuses y conflictos con peatones y ciclistas. Las condiciones prevalecientes de la calle describen las características geométricas de los accesos en términos del número y ancho de carriles, pendientes y uso de carriles incluyendo carriles de estacionamiento. Las condiciones prevalecientes del semáforo incluyen la secuencia de fases, asignación de tiempos y el tipo de operación o control.

El flujo de saturación se expresa en vehículos por hora de luz verde, y puede determinarse mediante estudios de campo o calcularse con la siguiente expresión:

$$s = s_o N f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{Lu} f_{LT} f_{RT} f_{Lpb} f_{Rpb} \quad (5.10)$$

Donde:

- s : tasa de flujo de saturación para el grupo de carriles considerado, expresada como un total para todos los carriles en el grupo de carriles, (veh/h)
- s_o : flujo de saturación base por carril, (veh/ h/carril)
- N : número de carriles en el grupo
- f_w : factor de ajuste del ancho del carril
- f_{HV} : factor de ajuste por los vehículos pesados en el flujo vehicular
- f_g : factor de ajuste por la pendiente del acceso
- f_p : factor de ajuste por la existencia de un carril de estacionamiento y de actividad de estacionamiento adyacente al grupo de carriles

- f_{bb} : factor de ajuste por el efecto de bloqueo de los autobuses locales, que se paran dentro del área de la intersección
- f_a : factor de ajuste por el tipo de área
- f_{Lu} : factor de ajuste por la utilización del carril
- f_{LT} : factor de ajuste por las vueltas a la izquierda en el grupo de carriles
- f_{RT} : factor de ajuste por las vueltas a la derecha en el grupo de carriles
- f_{Lpb} : factor de ajuste por los peatones y bicicletas para los movimientos de vuelta a la izquierda
- f_{Rpb} : factor de ajuste por peatones y bicicletas para los movimientos de vuelta a la derecha

Tabla 5.3 Factores de ajuste a la tasa de flujo de saturación

Factor	Fórmula	Definición de variables	Notas
Ancho de carril	$f_w = 1 + \frac{(W - 3.6)}{9}$	W = ancho de carril (m)	W ≥ 2.4m Si W ≥ 4.8 m, analizar como dos carriles
Vehículos pesados	$f_{HV} = \frac{100}{100 + \% HV (E_T - 1)}$	%HV= porcentaje de vehículos pesados del grupo	ET=2.0 autos/pesado
Pendiente	$f_g = 1 - \frac{\% G}{200}$	%G= porcentaje de pendiente del acceso	-6 ≤ %G ≤ +10 Negativa en descensos
Estacionamiento	$f_p = \frac{N - 0.1 - \frac{18N_m}{3600}}{N}$	N= número de carriles del grupo Nm= número de maniobras de estacionamiento/h	0 ≤ Nm ≤ 180 fp ≥ 0.050 fp= 1.000 para sin estacionamiento
Obstrucción de los autobuses	$f_{bb} = \frac{N - \frac{14.4N_B}{3600}}{N}$	N= número de carriles del grupo NB= número de buses que paran por hora	0 ≤ NB ≤ 250 Fbb ≥ 0.050
Tipo de área	$f_a = 0.900 \text{ en CBD}$ $f_a = 1.000 \text{ en otras áreas}$	CDB= distrito Central de Negocios (centro de la ciudad)	
Utilización de carriles	$f_{Lu} = \frac{v_g}{(v_{g1}N)}$	vg= tasa de flujo de demanda no ajustada del grupo de carril (veh/h) vg1= tasa de flujo de demanda no ajustada del carril con el volumen más alto del grupo N=número de carriles del grupo	
Vueltas a la izquierda	Fase protegida: Carril exclusivo: $f_{LT} = 0.95$ Carril compartido: $f_{LT} = \frac{1}{1.0 + 0.05P_{LT}}$	PLT= proporción de vueltas a la izquierda en el grupo de carriles	

Vueltas a la derecha	Carril exclusivo: $f_{RT} = 0.85$ Carril compartido: $f_{RT} = 1.0 - 0.15P_{RT}$ Carril exclusivo: $f_{RT} = 1.0 - 0.135P_{RT}$	PRT= proporción de vueltas a la derecha en el grupo de carriles	fRT≥0.050
Bloqueo por peatones y bicicletas	Ajuste LT: $f_{Lpb} = 1.0 - \frac{P_{LT}(1 - A_{pbT})}{(1 - P_{LTA})}$ Ajuste RT: $f_{Rpb} = 1.0 - \frac{P_{RT}(1 - A_{pbT})}{(1 - P_{RTA})}$	PLT= proporción de vueltas a la izquierda en el grupo de carriles ApbT=ajuste a la fase permitida PLTA= proporción de vueltas a la izquierda que usan la fase protegida PRT= proporción de vueltas a la derecha en el grupo de carriles PRTA= proporción de vueltas a la derecha que usan la fase protegida	

Fuente: HCM (TRB 2000)

5.4.5 Determinación de la capacidad y la relación volumen a capacidad

Capacidad:

La capacidad en una intersección con control con semáforos se define para cada acceso o grupo de carriles, como la tasa de flujo máxima que puede pasar a través de la intersección bajo condiciones prevalecientes del tránsito, de la calle y del semáforo. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$c_i = s_i \frac{g_i}{C} \quad (5.11)$$

Donde:

- ci= capacidad del grupo de carriles i (vehículos/h)
- si= tasa de flujo de saturación del grupo de carriles i (vehículos/hora verde)
- gi= tiempo verde efectivo para el grupo de carriles i (segundos)
- C= ciclo del semáforo (segundos)
- gi/C= relación de verde efectivo para el grupo de carriles i

Relación volumen a capacidad:

La relación volumen a capacidad, típicamente llamada grado de saturación, y simbolizado con la letra X, se calcula como:

$$X_i = \frac{v_i}{c_i} \quad (5.12)$$

Donde vi, es la tasa de flujo de demanda actual o proyectada del grupo de carriles i. Reemplazando la capacidad se obtiene:

$$X_i = \frac{v_i}{s_i \left(\frac{g_i}{C}\right)} = \frac{\left(\frac{v}{s}\right)_i}{\left(\frac{g_i}{C}\right)} \quad (5.13)$$

En esta última expresión, al cociente $(v/s)_i$, se le denomina relación de flujo. Obsérvese que cuando la tasa de flujo v_i es igual a la capacidad c_i , el grado de saturación X_i es igual a 1.00, y cuando la tasa de flujo v_i es cero, X_i es igual a cero. Valores de X_i superiores a 1.00, indican un exceso de demanda sobre la capacidad.

Para evaluar globalmente la intersección, con respecto a su geometría y al ciclo, se utiliza el concepto de *grado de saturación crítico* de la intersección X_c . considera solamente los accesos o grupos de carriles críticos, definidos como aquellos que tienen la relación de flujo más alta para cada fase $(v/s)_i$. Se define como:

$$X_c = \left(\frac{C}{C-L}\right) \left[\sum \left(\frac{v}{s}\right)_{ci} \right] \quad (5.14)$$

Donde:

X_c = relación volumen a capacidad crítica de la intersección

C = ciclo del semáforo (s)

L = tiempo total perdido por ciclo (s)

$\sum \left(\frac{v}{s}\right)_{ci}$ = sumatoria de las relaciones de flujo de todos los grupos de carriles críticos i

5.4.6 Determinación de las demoras

Los valores derivados de los cálculos representan la demora media por control experimentada por todos los vehículos que llegan en el período de análisis, incluidas las demoras que ocurren antes del período de análisis cuando el grupo de carriles está sobresaturado. La demora por control incluye los movimientos a velocidades bajas y las detenciones en los accesos a la intersección, cuando los vehículos disminuyen la velocidad corriente arriba o cambian de posición en la cola. Se calcula como:

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3 \quad (5.15)$$

Donde:

d = demora media por control (s/veh)

d_1 = demora uniforme (s/veh), suponiendo llegadas uniformes

PF = factor de ajuste por coordinación. Tiene en cuenta los efectos de la coordinación de los semáforos

d_2 = demora incremental (s/veh), que tiene en cuenta el efecto de llegadas aleatorias y colas sobresaturadas durante el período de análisis (supone que no existe cola inicial al comienzo del período de análisis)

d_3 = demora por cola inicial (s/veh), que tiene en cuenta las demoras de todos los vehículos debido a la presencia de colas iniciales antes del período de análisis

Factor de ajuste por coordinación:

Una buena coordinación de semáforos dará como resultado una proporción alta de vehículos que llegan en el verde. La coordinación afecta principalmente a la demora uniforme, por lo que se realiza el ajuste sólo a d_1 , mediante la siguiente expresión:

$$PF = \frac{(1-P)f_{PA}}{1-\left(\frac{g}{C}\right)} \quad (5.16)$$

Donde:

PF = factor de ajuste por coordinación

P = proporción de vehículos que llegan en verde

g/C = proporción de tiempo verde disponible

f_{PA} = factor de ajuste suplementario por grupos vehiculares que llegan durante el verde

Si se llevan a cabo mediciones de campo, P deberá determinarse como la proporción de los vehículos en el ciclo que llegan a la línea de alto o que se unen a la cola (estática o en movimiento) mientras se despliega la fase verde.

El valor de P también se puede estimar como:

$$P = R_p \left(\frac{g}{C}\right) \quad (5.17)$$

Donde:

R_p representa la relación de grupo de vehículos.

Demora uniforme:

La demora uniforme d₁, es la que ocurriría si los vehículos llegaran uniformemente distribuidos, tal que no existe saturación durante ningún ciclo. Se determina mediante la siguiente expresión:

$$d_1 = \frac{0.5c\left(1-\frac{g}{C}\right)^2}{1-\left[\min\left(1,X\right)\frac{g}{C}\right]} \quad (5.18)$$

Donde:

d₁ = demora uniforme asumiendo llegadas uniformes (s/veh)

C = ciclo del semáforo (s)

g = tiempo verde efectivo para el grupo de carriles i (s)

X = v/c volumen a capacidad o grado de saturación por grupo de carriles

Demora incremental:

La demora incremental d₂. Toma en consideración las llegadas aleatorias, que ocasiona que algunos ciclos se sobresaturen. Se expresa como:

$$d_2 = 900T \left[(X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right] \quad (5.19)$$

Donde:

d₂ = demora incremental (s/veh)

T = duración del período de análisis (h)

k = factor de demora incremental que depende del ajuste de los controladores en intersección accionada

I = factor de ajuste por entrada de la intersección corriente arriba

c = capacidad del grupo de carriles (veh/h)
 X = grado de saturación o v/c volumen a capacidad del grupo de carriles

Demora por cola inicial:

Cuando una cola residual o remanente existe antes del período de análisis T , los vehículos experimentan (los que llegan durante T) una demora adicional, debido a que la cola inicial deberá primero desalojar la intersección.

En los casos en que $X > 1.0$ para un período de 5 minutos, el siguiente período empieza con una cola inicial llamada Q_b en vehículos. Q_b se debe observar al inicio del rojo. Cuando $Q_b \neq 0$, los vehículos que llegan durante el período de análisis experimentan una demora adicional por la presencia de la cola inicial. La demora por cola inicial d_3 , se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$d_3 = \frac{1800Q_b(1+u)t}{cT} \quad (5.20)$$

Donde:

Q_b = cola inicial al principio del período T (veh)
 c = capacidad (veh/h)
 T = duración del período de análisis (h)
 t = duración de la demanda insatisfecha (h)
 u = parámetro de demora

Existen cinco escenarios, para estimar esta demora:

- *Caso I:* el período es no saturado sin cola inicial, $Q_b = 0$. Por lo tanto, $d_3 = 0$.
- *Caso II:* el período es sobresaturado, sin cola inicial, $Q_b = 0$. Por lo tanto, $d_3 = 0$.
- *Caso III:* ocurre cuando la cola inicial Q_b se disipa durante T . para que esto ocurra deberá cumplirse que $Q_b + qT < cT$, siendo qT la demanda total en T , y cT la capacidad disponible en T .
- *Caso IV:* ocurre cuando existe aún demanda insatisfecha al final de T , pero decreciente, para que esto ocurra deberá cumplirse que $qT < cT$.
- *Caso V:* ocurre cuando la demanda en T , excede la capacidad. Aquí la demanda insatisfecha se incrementa la final de T . Para que esto ocurra deberá cumplirse que $qT > cT$.

Para los casos III, IV y V:

$t = 0$ si $Q_b = 0$, de otra manera:

$$t = \min \left\{ T, \frac{Q_b}{c[1-\min(1,X)]} \right\} \quad (5.21)$$

$u = 0$ si $t < T$, de otra manera:

$$u = 1 - \frac{cT[1-\min(1,X)]}{Q_b} \quad (5.22)$$

El tiempo de despeje T_c se calcula con la siguiente ecuación:

$$T_c = \max \left(T, \frac{Q_b}{c} + TX \right) \quad (5.23)$$

Demoras agregadas:

Las demoras en cualquier acceso, se determina como un promedio ponderado de las demoras totales de todos los grupos de carriles del acceso, utilizando los flujos ajustados de los grupos de carriles, según:

$$d_A = \frac{\sum d_i v_i}{\sum v_i} \quad (5.24)$$

Donde:

d_A = demora en el acceso A (s/veh)

d_i = demora en el grupo de carriles i, en el acceso A (s/veh)

v_i = volumen ajustado del grupo de carriles i (veh/h)

La demora de la intersección, igualmente se determina como un promedio ponderado de las demoras en todos los accesos de la intersección, según:

$$d_I = \frac{\sum d_A v_A}{\sum v_A} \quad (5.25)$$

Donde:

d_I = demora de la intersección I (s/veh)

d_A = demoras en el acceso A (s/veh)

v_A = volumen ajustado del acceso A (veh/h)

5.4.7 Determinación del nivel de servicio

El nivel de servicio de una intersección está directamente relacionado con la demora promedio por controles por vehículo. Una vez obtenida la demora para cada grupo de carriles y agregada para cada acceso y para la intersección como un todo, se determinan los niveles de servicio, mediante la tabla 5.4:

Tabla 5.4 Niveles de servicio en intersecciones con semáforos

Nivel de servicio	Demora (s/veh)
A	≤ 10
B	De 10 a 20
C	De 20 a 35
D	De 35 a 55
E	De 55 a 80
F	> 80

Fuente: HCM (TRB, 2000)

5.5 Valores por omisión recomendados por el HCM 2000

El HCM 2000 recomienda el uso de valores por omisión cuando no haya sido posible conseguir toda la información de campo para desarrollar la metodología operacional. Sin embargo, como el HCM indica, el uso de varios de estos valores reduciría la precisión del análisis macroscópico desarrollado y solo deberían ser usados en situaciones semejantes a las asumidas en el HCM 2000. Sin embargo, como se mencionó anteriormente estos valores se aplican muchas veces sin tener en cuenta ningún tipo de restricción ni las características de la circulación.

La tabla 5.5 muestra los valores por omisión que recomienda el HCM 2000 en condiciones ideales.

Tabla 5.5 Valores por omisión recomendados por el HCM 2000

<i>Característica</i>	<i>Valor sustitutivo por omisión</i>
Flujo de saturación base:	1900 vehículos/hora/carril
Porcentaje de vehículos pesados:	2%
Factor horario de máxima demanda:	0.92
Maniobras de parqueo por hora (1 sentido):	16
Maniobras de parqueo por hora (2 sentidos):	8
Tipo de arribo a la intersección:	Aleatorio
Parada de autobuses por hora (CBD):	12
Parada de autobuses por hora (otros):	2
Volumen peatonal (CBD):	400 peatones/h
Volumen peatonal (otros):	50 peatones/hora
Pendiente de accesos:	0%
Ancho de carriles:	3.6 m

Fuente: HCM (TRB, 2000)

El Flujo de Saturación es la tasa máxima de flujo (vehículos) que pueden atravesar la intersección en el grupo de carriles existentes en la vía y sus condiciones, asumiendo que los carriles tienen 100% de tiempo efectivo con luz verde del semáforo, se expresa en unidades de vehículos por hora de verde. El flujo de saturación es el valor más importante que se utiliza para determinar la Capacidad y Niveles de Servicio en intersecciones controladas por semáforos, por eso, es de suma importancia utilizar un valor adecuado para intersecciones seleccionadas atendiendo las necesidades de cada una. Como lo muestra la tabla 5.5, el valor del flujo de saturación base recomendado por el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000) es de 1900 vehículos/hora/carril, sin embargo, ese valor está basado en estudios realizados en los Estados Unidos de América en condiciones ideales. En los siguientes capítulos se definirá el Flujo de Saturación, se mostrará la metodología del HCM 2000 para obtenerlo y se estimará el valor adecuado para la Ciudad de México, de acuerdo a las necesidades que se presentan en la actualidad en las intersecciones semaforizadas.

Capítulo 6.
FLUJO DE SATURACIÓN Y
MÉTODOS PARA DETERMINARLO

6. FLUJO DE SATURACIÓN Y MÉTODOS PARA DETERMINARLO

6.1 Tiempo perdido de puesta en marcha e intervalo de saturación

Para determinar la tasa de flujo de saturación real, el tiempo perdido en la puesta en marcha de los vehículos deberá entenderse y tomarse en cuenta. El inicio de la puesta en marcha se puede describir de la siguiente manera:

Cuando la señal de semáforo cambia a verde, los vehículos de la fila empezarán a cruzar la intersección. El tiempo de avance entre los vehículos se pueden describir como el intervalo de tiempo transcurrido entre los vehículos que cruzan la línea de la intersección sucesivamente. El primer intervalo será el tiempo necesario que tome que el eje trasero del primer vehículo cruce la línea de alto. El segundo intervalo de avance, será el transcurrido entre el cruce del eje trasero del primer vehículo y hasta el cruce del eje trasero del segundo vehículo sobre la línea de alto.

El primer conductor de la fila necesita observar y estar al pendiente del cambio de la luz roja a verde del semáforo. Después de la observación, el conductor acelera el vehículo para cruzar la intersección y el intervalo de tiempo que tarda es relativamente largo. El segundo conductor realiza el mismo proceso con la excepción de que el conductor podría reaccionar y comenzar a acelerar, mientras que el primer vehículo comenzó a moverse. Esto resulta un tiempo de avance más corto que el primero, debido a que el conductor tenía una longitud extra para avanzar entre el primer vehículo que aceleró. Este proceso se lleva a través de todos los vehículos siguientes donde los progresos de cada vehículo serán ligeramente más cortos que el vehículo precedente. Esto continúa hasta que un cierto número de vehículos han cruzado la intersección y la reacción de puesta en marcha y la aceleración ya no tienen un efecto sobre los intervalos de tiempo para cruzar la intersección. Desde este punto, los intervalos de tiempo de cruce se mantendrán relativamente constantes hasta que todos los vehículos en la cola hayan cruzado la intersección o el tiempo de verde haya terminado. Este intervalo de tiempo constante de avance se conoce como el intervalo de tiempo de flujo de saturación y puede empezar a ocurrir en cualquier parte entre el tercero y sexto vehículo en la fila, por lo general en el cuarto. La figura 6.1 muestra la situación descrita anteriormente:

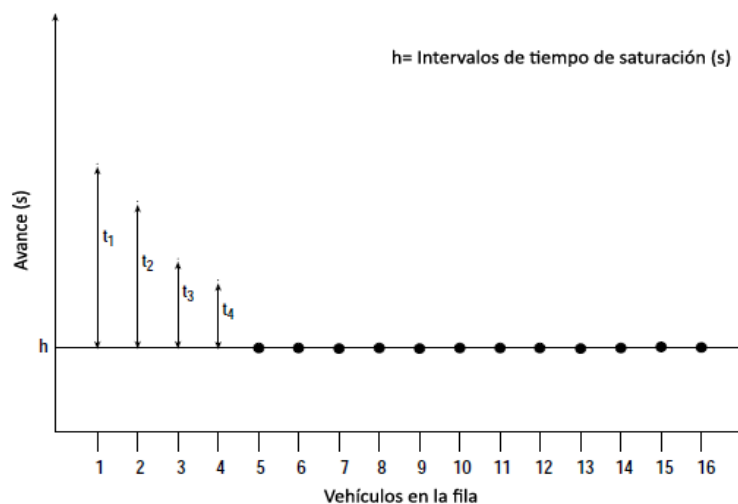


Figura 6.1 Intervalos de tiempo de flujo de saturación y tiempo perdido.
Fuente: HCM (TRB, 2000)

6.2 Flujo de saturación

Se define como flujo de saturación al máximo volumen de tránsito que pudiera entrar en una intersección semaforizada, por un acceso, carril o carriles del mismo, si el semáforo exhibiese siempre su indicación verde.

Ocurre en la realidad, cuando los vehículos desarrollan su máxima velocidad normal al entrar en la intersección, partiendo generalmente del reposo en una cola; mientras los vehículos no alcancen la velocidad deseada por los conductores y puedan desarrollarla al entrar en la intersección, el volumen de tránsito en el punto de entrada es inferior al flujo de saturación.

El flujo de saturación se suele expresar en vehículos (por acceso, carril o carriles) por hora de verde. De acuerdo con lo establecido en el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000) de los Estados Unidos, se considera que un vehículo entra en una intersección cuando su eje trasero cruza por la Línea de ALTO.

El flujo de saturación es la tasa máxima de vehículos que cruzan la línea que puede ser obtenida, cuando existen filas y éstas aún persisten hasta el final del período verde. En este caso, se tiene un período de verde completamente saturado. La figura 6.2 muestra las relaciones fundamentales que caracterizan este fenómeno:

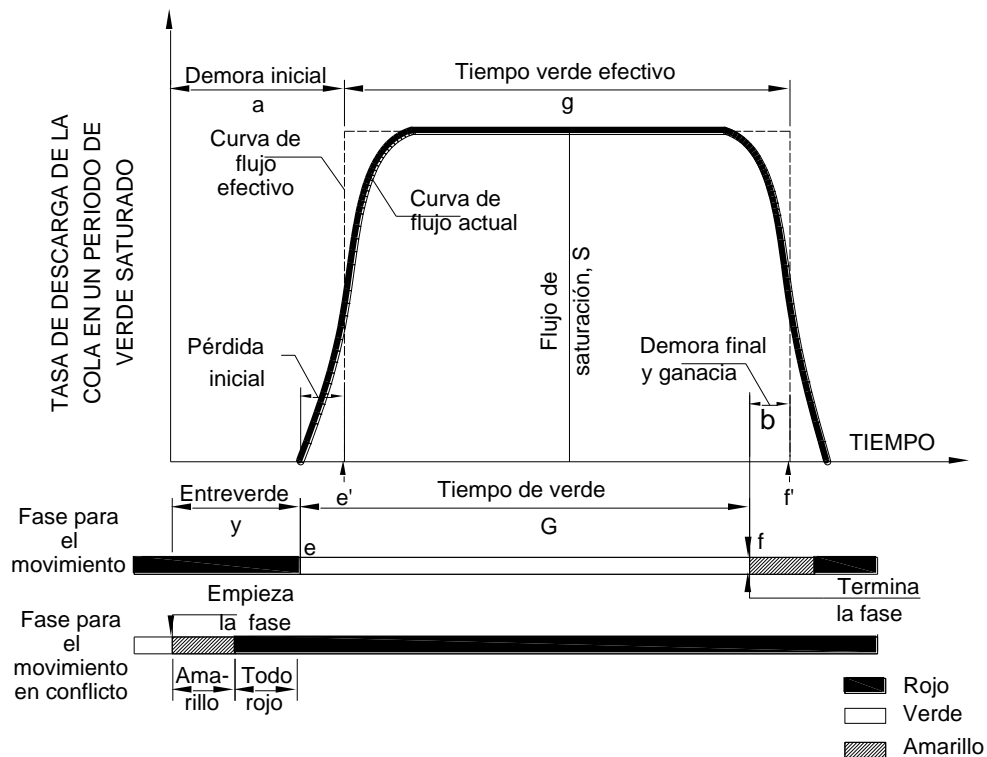


Figura 6.2 Modelo básico del flujo de saturación.

Fuente: Ingeniería de Tránsito (Cal y Mayor R. & Cárdenas G., 2010)

La línea punteada indica el modelo básico o curvo de flujo efectivo, que reemplaza la curva de flujo actual de vehículos que cruzan la línea por un rectángulo de igual área, cuya altura es el flujo de

saturación s y cuyo ancho es el tiempo verde efectivo g . En otras palabras, el área bajo la curva, sg , representa el máximo número de vehículos que cruzan la línea de un ciclo promedio.

6.3 Flujo de saturación base

La tasa de flujo de saturación, es la tasa de flujo en vehículos/hora que puede soportar el grupo de carriles, si continuamente tiene la luz verde (es decir, si $g/C = 1$). La tasa de flujo de saturación depende de un *flujo de saturación base* (s_0), expresando en vehículos/hora/carril. Entonces el flujo de saturación base se ajusta a las condiciones prevalecientes, para obtener el flujo de saturación para el grupo de carriles que se está considerando. El ajuste se hace mediante la introducción de factores de corrección para el número de carriles, el ancho del carril, el porcentaje de vehículos pesados en el tránsito, la pendiente en el acceso, la actividad de estacionamiento, los autobuses locales que paran dentro de la intersección, el tipo de área, el factor de utilización de carriles, y las vueltas a la derecha y a la izquierda.

6.4 Metodología para obtener el flujo de saturación seguido por el HCM 2000

El Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000) define el flujo de saturación como: “la cantidad máxima de automóviles livianos que podrían atravesar la intersección si el tiempo de verde efectivo estuviese disponible el 100% del tiempo ($g/C = 1.0$) bajo condiciones ideales”, es decir tener:

- Ancho de carriles de 3.6 m,
- 0% de vehículos pesados,
- Accesos planos,
- No presencia de estacionamientos ni parada de autobuses cerca de la intersección,
- Área con poco flujo peatonal y ciclistas,
- Utilización uniforme de los carriles y
- Solo flujos directos sin giros a la izquierda o derecha, etc.

Cualquier variación de las condiciones ideales afecta, directamente, la tasa de flujo saturación base cuyo valor por omisión, sugerido por el HCM 2000, es de 1900 veh/h/carril. Este valor es calculado bajo las condiciones ideales aplicando la siguiente ecuación:

$$s = \frac{3600}{h} \quad (6.1)$$

Donde:

s = tasa de flujo de saturación (veh/h/carril).

h = intervalo de saturación en segundos (segundos).

3600 = número de segundos por hora.

Este flujo de saturación ideal es después ajustado por factores que afectan las condiciones prevalecientes del tránsito vehicular para obtener el flujo de saturación para un carril o un grupo de carriles considerados. El ajuste es hecho introduciendo los siguientes factores que corrigen las condiciones para que se asemejen a las ideales:

- Número de carriles.
- Acho de carriles.
- Vehículos pesados en el flujo de tránsito.
- Pendiente del acceso.
- Estacionamientos adyacentes al grupo de carriles.
- Autobuses.
- El tipo de área.
- La utilización del carril.
- Vueltas a la derecha y a la izquierda.
- Peatones y ciclistas que hacen interferencia con los vehículos que dan vuelta. (Dunlap, 2005)

Por lo tanto el índice de saturación de un grupo de carriles, para condiciones diferentes a la ideal, se obtiene mediante la siguiente ecuación, según el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000):

$$s = s_o N f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{Lu} f_{LT} f_{RT} f_{Lpb} f_{Rpb} \quad (6.2)$$

Donde:

- s: tasa de flujo de saturación para el grupo de carriles considerado, expresada como un total para todos los carriles en el grupo de carriles, (veh/h)
- s_o: flujo de saturación base por carril, (veh/ h/carril)
- N: número de carriles en el grupo
- f_w: factor de ajuste del ancho del carril
- f_{HV}: factor de ajuste por los vehículos pesados en el flujo vehicular
- f_g: factor de ajuste por la pendiente del acceso
- f_p: factor de ajuste por la existencia de un carril de estacionamiento y de actividad de estacionamiento adyacente al grupo de carriles
- f_{bb}: factor de ajuste por el efecto de bloqueo de los autobuses locales, que se paran dentro del área de la intersección
- f_a: factor de ajuste por el tipo de área
- f_{Lu}: factor de ajuste por la utilización del carril
- f_{LT}: factor de ajuste por las vueltas a la izquierda en el grupo de carriles
- f_{RT}: factor de ajuste por las vueltas a la derecha en el grupo de carriles
- f_{Lpb}: factor de ajuste por los peatones y bicicletas para los movimientos de vuelta a la izquierda
- f_{Rpb}: factor de ajuste por peatones y bicicletas para los movimientos de vuelta a la derecha

Tabla 6.1 Factores de ajuste a la tasa de flujo de saturación

Factor	Fórmula	Definición de variables	Notas
Ancho de carril	$f_w = 1 + \frac{(W - 3.6)}{9}$	W = ancho de carril (m)	W ≥ 2.4m Si W ≥ 4.8 m, analizar como dos carriles
Vehículos pesados	$f_{HV} = \frac{100}{100 + \% HV (E_T - 1)}$	%HV= porcentaje de vehículos pesados del grupo	ET=2.0 autos/pesado
Pendiente	$f_g = 1 - \frac{\% G}{200}$	%G= porcentaje de pendiente del acceso	-6 ≤ %G ≤ +10 Negativa en descensos

Estacionamiento	$f_p = \frac{N - 0.1 - \frac{18N_m}{3600}}{N}$	N= número de carriles del grupo Nm= número de maniobras de estacionamiento/h	$0 \leq N_m \leq 180$ $f_p \geq 0.050$ $f_p = 1.000$ para sin estacionamiento
Obstrucción de los autobuses	$f_{bb} = \frac{N - \frac{14.4N_B}{3600}}{N}$	N= número de carriles del grupo NB= número de buses que paran por hora	$0 \leq N_B \leq 250$ $F_{bb} \geq 0.050$
Tipo de área	$f_a = 0.900$ en CBD $f_a = 1.000$ en otras áreas	CDB= distrito Central de Negocios (centro de la ciudad)	
Utilización de carriles	$f_{Lu} = \frac{v_g}{(v_{g1}N)}$	vg= tasa de flujo de demanda no ajustada del grupo de carril (veh/h) vg1= tasa de flujo de demanda no ajustada del carril con el volumen más alto del grupo N=número de carriles del grupo	
Vueltas a la izquierda	Fase protegida: Carril exclusivo: $f_{LT} = 0.95$ Carril compartido: $f_{LT} = \frac{1}{1.0 + 0.05P_{LT}}$	PLT= proporción de vueltas a la izquierda en el grupo de carriles	
Vueltas a la derecha	Carril exclusivo: $f_{RT} = 0.85$ Carril compartido: $f_{RT} = 1.0 - 0.15P_{RT}$ Carril exclusivo: $f_{RT} = 1.0 - 0.135P_{RT}$	PRT= proporción de vueltas a la derecha en el grupo de carriles	$f_{RT} \geq 0.050$
Bloqueo por peatones y bicicletas	Ajuste LT: $f_{Lpb} = \frac{1.0 - P_{LT}(1 - A_{pbT})}{(1 - P_{LTA})}$ Ajuste RT: $f_{Rpb} = \frac{1.0 - P_{RT}(1 - A_{pbT})}{(1 - P_{RTA})}$	PLT= proporción de vueltas a la izquierda en el grupo de carriles ApbT=ajuste a la fase permitida PLTA= proporción de vueltas a la izquierda que usan la fase protegida PRT= proporción de vueltas a la derecha en el grupo de carriles PRTA= proporción de vueltas a la derecha que usan la fase protegida	

Fuente: HCM (TRB, 2000)

6.5 Metodología del HCM para la recopilación de datos de campo para obtener el flujo de saturación

Para eliminar la variación en la recolección de datos de campo de la tasa de flujo de saturación, el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000) establece un procedimiento detallado a seguir. La metodología se ilustra mediante el siguiente ejemplo.

Este ejemplo describe un estudio de flujo de saturación de un solo carril. Se recomienda un equipo de dos personas en campo, sin embargo, una persona es suficiente. Las notas y tareas de campo identificadas en la siguiente sección deben ser ajustadas en consecuencia.

1- Tareas generales:

- a) Registrar el tipo de área, ancho y pendiente del carril en estudio.
- b) Rellenar los datos de la “hoja de estudio de campo para estimar el flujo de saturación” proporcionada por el HCM 2000.
- c) Seleccionar un punto de observación en donde la línea de “alto” para el carril en estudio y las señales correspondientes sean claramente visibles.
- d) El punto de referencia es normalmente la línea de “alto”. Los vehículos deben detenerse constantemente detrás de esta línea. Cuando un vehículo cruza sin obstáculos, éste ha entrado en el espacio de la intersección en conflicto con el propósito de la medición de la tasa de flujo de saturación. Vehículos que dan vuelta a la derecha o a la izquierda oponiéndose al flujo del tránsito o cediendo a los peatones no se registran hasta que se proceda a través del tránsito opuesto.

2- Tareas a recordar:

- a) Tener en cuenta el último vehículo que se detuvo en la cola cuando la señal cambia a luz verde.
- b) Describir el último vehículo para el temporizador.
- c) Anotar en la hoja de campo los vehículos pesados y los vehículos que dan vuelta a la derecha o a la izquierda.
- d) Registrar el tiempo mostrado por el temporizador.

3- Tareas del temporizador:

- a) Poner en marcha el cronómetro al comienzo de la luz verde y notificar al registrador.
- b) Contar en voz alta cada vehículo en la cola cuando su eje trasero cruza la línea de “alto”.
- c) Decir en voz alta el tiempo del cuarto, el décimo, y el último vehículo en la cola.
- d) Si los vehículos de la cola todavía están entrando en la intersección al final de la luz verde, decir en voz alta el número del último vehículo que cruzó en la saturación de la fase de verde.

Tomar nota de cualquier acontecimiento inusual que pueda haber influido en la tasa de flujo de saturación, como los autobuses, vehículos detenidos o atorados y paradas de camiones. El periodo de la tasa de flujo de saturación empieza cuando el eje trasero del cuarto vehículo en la cola cruza la línea de “alto” o punto de referencia y termina cuando el eje trasero del último vehículo de la cola del comienzo de la fase de verde cruza la línea de “alto”.

Las mediciones se toman ciclo por ciclo. Para reducir los datos de cada ciclo, el tiempo registrado para el cuarto vehículo se le resta al tiempo registrado para el último vehículo en la cola. Este valor es avance total para (n-4) vehículos, donde n es el número del último vehículo examinado (éste no puede ser el último vehículo de la cola). El avance total se divide por (n-4) para obtener el avance promedio por vehículo bajo la tasa de saturación. La tasa de flujo de saturación es 3600 dividido por este valor. Por ejemplo, si el tiempo para el cuarto vehículo fue de 10.2 segundos y el tiempo para el catorceavo y último vehículo examinado fue de 36.5 segundos, el promedio del avance de flujo por vehículo sería $(36.5-10.2)/(14-4)= 26.3/10= 2.63$ segundos/vehículo. Y la tasa de flujo de saturación prevaeciente en ese ciclo sería $3600/2.63= 1369$ vehículos/h/carril.

$$s = \frac{3600}{(T_u - T_4) / (\#_u - 4)} \quad (6.3)$$

Con el fin de obtener un valor estadísticamente significativo, es necesario un mínimo de 15 ciclos de semáforo con más de 8 vehículos en la cola inicial. Un promedio de los valores de la tasa de flujo de saturación en ciclos individuales representa entonces la tasa de flujo de saturación local del momento para el carril estudiado. El porcentaje de vehículos pesados y de vehículos que dan vuelta en la muestra de estudio deben determinarse y señalarse como referencia para los cálculos.

A continuación se muestra la hoja de estudio de campo que facilita el HCM 2000, para obtener los datos necesarios para estimar el flujo de saturación:

FIELD SATURATION FLOW RATE STUDY WORKSHEET																		
General Information									Site Information									
Analyst _____									Intersection _____									
Agency or Company _____									Area Type <input type="checkbox"/> CBD <input type="checkbox"/> Other									
Date Performed _____									Jurisdiction _____									
Analysis Time Period _____									Analysis Year _____									
Lane Movement Input																		
										Movements Allowed <input type="checkbox"/> Through <input type="checkbox"/> Right turn <input type="checkbox"/> Left turn								
Identify all lane movements and the lane studied																		
Input Field Measurement																		
Veh. in queue	Cycle 1			Cycle 2			Cycle 3			Cycle 4			Cycle 5			Cycle 6		
	Time	HV	T	Time	HV	T	Time	HV	T	Time	HV	T	Time	HV	T	Time	HV	T
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
End of saturation																		
End of green																		
No. veh. > 20																		
No. veh. on yellow																		
Glossary and Notes																		
HV - Heavy vehicles (vehicles with more than 4 tires on pavement) T - Turning vehicles (L - Left, R - Right) Pedestrians and buses that block vehicles should be noted with the time that they block traffic, for example, P12 - Pedestrians blocked traffic for 12 s B15 - Bus blocked traffic for 15 s																		

Figura 6.3 Hoja de estudio de campo para recolectar datos y estimar el flujo de saturación.
 Fuente: HCM (TRB, 2000)

6.6 Técnicas de medición del flujo de saturación

Todos los métodos existentes de medición de flujo de saturación asumen que la tasa se obtiene durante la fase de verde saturada. Existen tres métodos para estimar el flujo de saturación base:

a) *Método del tiempo de cruce de la intersección.*

Estima el tiempo promedio existente entre los vehículos que cruzan la línea de alto. Se eliminan los primeros vehículos (de acuerdo con el HCM, los primeros 4 vehículos) para excluir de la medición aquellos vehículos afectados por el tiempo de retraso por el inicio de la fase verde. El flujo de saturación es obtenido como el recíproco del tiempo entre vehículos que cruzan la línea de alto.

b) *Método de regresión.*

Obtener una ecuación que involucre el tiempo de saturación en la fase verde, el número de vehículos por categoría y las demoras. Este método es útil también para estimar el factor de equivalencia a vehículos ligeros.

c) *Método TRL.*

Conteo de los vehículos en tres fases verdes saturadas. El flujo de saturación se calcula con la división del número de vehículos del intervalo medio entre la duración del intervalo.

6.7 Otras metodologías existentes para determinar el flujo de saturación

Existen varios métodos para la recopilación de datos y medir el flujo de saturación, que van desde métodos manuales hasta técnicas automatizadas complejas. En este capítulo se presentan los métodos existentes más utilizados por los investigadores para registrar el flujo de saturación en intersecciones semaforizadas. Todos estos métodos tienen sus ventajas y desventajas. El método que se seleccione debe ser en base a muchos factores, como el tipo de estudio, disponibilidad de mano de obra, la facilidad del análisis, costos, y debe proporcionar un registro permanente de los datos para su posterior análisis en cualquier momento.

6.7.1 Método del Laboratorio de estudios de carreteras

Este es un método manual para la recolección de datos para la estimación del flujo de saturación.

Según este método, el tiempo de luz verde más el de luz ámbar debe estar dividido en un intervalo corto, aproximadamente de 0.1 minuto (6 segundos). Todos aquellos vehículos cuyas ruedas traseras cruzan la línea de alto durante cada intervalo de 0.1 minuto deben ser contados.

Los flujos en los intervalos saturados, que son libres de recuperar el tiempo perdido, se promedian para obtener el flujo de saturación, se observa que el flujo de saturación de los primeros y los últimos intervalos son afectados por el conductor por la demora del comienzo de la luz ámbar y con la parada en el lapso de luz verde, respectivamente. El flujo de saturación observado en esos intervalos que están libres de tiempo perdido, deben estar comparados con el flujo de saturación en los primeros y últimos intervalos para obtener el tiempo perdido inicial y final, respectivamente. Algunas formas especiales son utilizadas en el sitio durante el proceso de estudio.

Dos cronómetros son requeridos para registrar los datos en las hojas de campo. Estos cronómetros deben registrar décimas y centésimas de minuto. Todos los tiempos deben registrarse con una aproximación de 0.01 minuto. Estrictamente los cronómetros a utilizarse deben sincronizarse antes del inicio del estudio de campo.

Este método es el más simple, pero tiene un inconveniente, causa dificultad en la clasificación de los diferentes tipos de vehículos y la grabación de los diversos movimientos de vueltas. Por lo tanto, se requiere mayor mano de obra para obtener resultados satisfactorios, lo que implica un estudio antieconómico.

6.7.2 Método del registro

En este método, los datos de campo deben ser registrados en una hoja de papel o cinta de papel, moviéndose a una velocidad constante. Toda la información relevante para el flujo de saturación debe ser registrada en papel. El análisis implica el trabajo manual de la medición de la distancia en la cinta o en la hoja para conocer el intervalo del tiempo. Por lo tanto, algunos errores son inevitables debido a la variación en el tiempo del observador. Los siguientes dos métodos son los que han sido utilizados por investigadores en estudios anteriores.

a) *Método de la máquina de escribir:*

Este método fue desarrollado por Helim en 1957-1958, durante el estudio de flujo de saturación en intersecciones controladas por semáforos en Newcastle y Gateshead en Inglaterra. Durante la observación en el estudio los vehículos fueron clasificados en cuatro grupos, vehículos ligeros, vehículos pesados, vehículos comerciales pesados y vehículos al servicio público.

Para la recolección de datos se utilizó una máquina de escribir con algunas modificaciones. Con el uso de ésta las mediciones estaban dentro del límite de 1/10 segundos, lo que permitió una recolección de datos apropiada para el análisis individual por vehículo, así como para el flujo de tránsito en conjunto.

b) *Método de registro del evento rustrak cuatro canales:*

Este método fue desarrollado mientras se recolectaban datos para el flujo de saturación y tiempo perdido en Aberdeen, Escocia, utilizando el mismo procedimiento del método del laboratorio de estudios de carreteras, pero permitiendo el conteo de los cuatro flujos de tránsito simultáneos y los tiempos de las fases del semáforo.

6.7.3 Método de la grabadora de casete operado con baterías

Este método fue utilizado por Miller para la recolección de datos de campo en siete ciudades de Australia. Era similar al método del Laboratorio de estudios de carreteras. La única diferencia es que en este método los datos se grababan en igual de en formatos de papel, en la cinta de grabación y luego se resumían los datos mediante la reproducción del casete grabado en el laboratorio. Se registraba toda la información requerida con el estudio, como los tipos de vehículo, los movimientos de giro, la señal de cambio de fase y los vehículos que cruzan la línea de alto durante los intervalos cortos.

6.7.4 Método de la fotografía en intervalos de tiempo

Es una técnica antigua y fue desarrollada ampliamente a través de muchos formatos recolectados en datos de ingeniería. Cada imagen puede ser considerada como una descripción gráfica de la posición de los vehículos que están dentro del campo de visión de la cámara en el momento del estudio. Mediante la comparación de las posiciones de los vehículos individuales en fotografías consecutivas, se puede estimar la distancia que se han movido dichos vehículos, y por lo tanto, los diversos parámetros del flujo de saturación pueden ser evaluados.

Para una medición precisa, una serie de señales equidistantes podrían ser marcadas a lo largo del tramo de calle antes que empiece la técnica de la fotografía. A través de estas marcas en las fotografías se pueden estimar las posiciones de los vehículos.

Los intervalos de tiempo de fotografía han demostrado ser una herramienta útil para la recopilación de datos en la ingeniería de tránsito para distintos estudios de esta rama. El inconveniente de este método es la imposibilidad que los equipos funcionen en exceso, es decir, cuatro fotografías por segundo, con una base de tiempo precisa.

6.7.5 Método de la videgrabadora

Durante las últimas tres décadas la videgrabadora ha demostrado ser el método alternativo más popular de registro del comportamiento del tránsito. Este equipo ha dado resultados más satisfactorios que el tiempo de la fotografía en su etapa de comienzo.

En la recopilación de datos de campo, la videocámara y el generador de números se utilizan para imponer el tiempo basado en los eventos de grabación. Hoy en día las cámaras cuentan con un sistema incorporado de tiempo en la grabación, que puede ser medido en fracciones de segundo.

Mientras la cámara está grabando debe estar colocada de tal manera que la línea de referencia sea visible y cada evento de tránsito debe abstraerse fácilmente. Este instrumento ha resultado satisfactorio, pero existe la desventaja de imágenes borrosas, que es menos evidente que el lapso de tiempo de fotografías.

Debido a la disponibilidad de la herramienta de movimiento lento en el reproductor de vídeo, que parece ser mejor que los otros métodos debido a la precisión y mano de obra requerida. Este método es muy utilizado por muchos investigadores.

6.7.6 Uso de Laboratorio de tránsito móvil

Esta es una versión avanzada del uso del método de la videgrabadora. Este es un método que utiliza vídeo digital y cámaras a 14 metros aproximadamente para registrar las colas que se presentan en el flujo de tránsito y las señales. Este laboratorio móvil se estaciona cerca de las intersecciones en estudio donde las operaciones del tránsito no sean afectadas por su presencia.

6.7.7 Métodos de Sistemas de Información Geográfica

Con los recientes avances de la de la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG), esta tecnología también se está utilizando para la recolección de datos para estudios de ingeniería de tránsito. Los datos recolectados mediante SIG tienen varias ventajas y algunas limitaciones. Se obtienen las imágenes de satélite de la zona de proyecto o área de interés y se obtienen los datos requeridos.

6.8 Flujos de saturación obtenidos en distintos países

Muchos estudios sobre el Flujo de Saturación se han realizado en diversas partes del mundo, éstos en condiciones normales. La tabla 6.2 muestra algunos de los estudios anteriores llevados a cabo, en donde se muestra el Flujo de Saturación medio obtenido y el tamaño de la muestra de cada estudio.

Tabla 6.2 Estudios de Flujo de Saturación anteriores en distintos países

Estudio	País	Flujo de Saturación (veh/hr/carril)	Tamaño de la muestra
Webster & Cobbe	Reino Unido	1800	100
Kimber et al.	Reino Unido	2080	64
Miller	Australia	1710	-
Branston	Reino Unido	1778	5
H.E.L. Athens	Grecia	1972	35
Shoukry & Huizayyin	Egipto	1617	18
Hussain	Malasia	1945	50
Coeyman & Meely	Chile	1603	4
Bhattacharya & Bhattacharya	India	1232	20
De Andrade	Brasil	1660	125

Fuente: Saturation Flow Rates (Bester, C. J. y Meyers, W.L., 2007)

Un importante estudio fue completado recientemente por el Instituto de Transporte de Texas. En ese estudio se investigó el efecto de los vehículos pesados, el límite de velocidad, la presión del tránsito, población de la zona, y el número de carriles, en la tasa de Flujo de Saturación. Ellos encontraron que la tasa de Flujo de Saturación en condiciones ideales (base) es de 1905 vehículos/hora/carril.

Durante el año 2012, la Universidad de Pekín realizó un estudio de comparación del Flujo de Saturación entre China y el Reino Unido. En donde se analizaron los Flujos de Saturación en carriles

que van derecho y que dan vuelta a la izquierda en distintas intersecciones y en intersecciones “tipo T”. En las tablas 6.3 y 6.4 se muestran los resultados que se obtuvieron.

Tabla 6.3 Comparación del Flujo de Saturación en distintas intersecciones de China y Reino Unido

País	Flujo de Saturación (veh/hr/carril). Carril derecho.	Flujo de Saturación (veh/hr/carril). Carril con vuelta a la izquierda.
China	1326	1177
Reino Unido	1691	1548

Fuente: The comparison Research of Capacity and Saturation Flow between China and UK (Depin, Peng, 2012)

Tabla 6.4 Comparación del Flujo de Saturación en intersecciones “tipo T” de China y Reino Unido

País	Flujo de Saturación (veh/hr/carril). Carril derecho.	Flujo de Saturación (veh/hr/carril). Carril con vuelta a la izquierda.
China	1465	1380
Reino Unido	1575	1758

Fuente: The comparison Research of Capacity and Saturation Flow between China and UK (Depin, Peng, 2012)

**Capítulo 7. METODOLOGÍA UTILIZADA EN CAMPO
PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS NECESARIOS
PARA DETERMINAR EL FLUJO DE SATURACIÓN BASE**

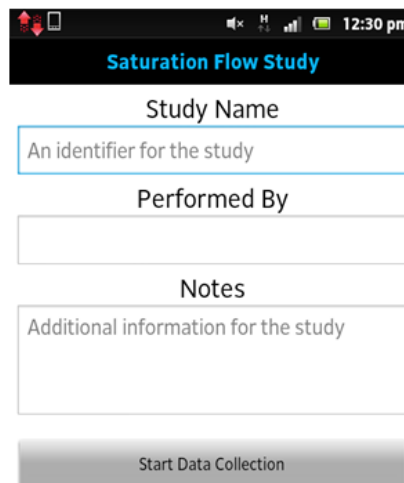
7. METODOLOGÍA UTILIZADA EN CAMPO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS NECESARIOS PARA DETERMINAR EL FLUJO DE SATURACIÓN BASE

El Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000) recomienda una metodología para la recopilación de datos de campo para obtener el flujo de saturación, esta metodología está descrita en el capítulo 6, sección 6.5. En esta ocasión, se seguirá una metodología muy parecida a la recomendada por el HCM 2000, que se describirá posteriormente. Los motivos causantes son debido a que el HCM 2000 indica utilizar temporizadores manuales y hojas de campo que posiblemente a la hora de obtener resultados no sean tan precisos como utilizar una aplicación móvil que registrará adecuadamente cada movimiento en tiempo exacto y se registren sus valores.

El flujo de saturación base se mide registrando el tiempo y el número de vehículos que cruzan la línea de alto de los que conforman la fila cuando empieza la fase de verde del semáforo. Se utiliza un punto del vehículo (eje trasero) para iniciar y detener el temporizador con el fin de no tener variaciones en la recolección de los datos. Para este estudio se tomaron en cuenta únicamente carriles con movimiento de frente.

Para obtener todos los datos de campo necesarios y poder determinar el flujo de saturación base, se utilizó la aplicación para dispositivos móviles mediante Sistema Android, llamada “Saturation Flow Study” (Estudio de Flujo de Saturación), y fue realizada por dos personas aplicando la siguiente metodología:

1. Buscar un punto de observación en donde se vea con claridad la línea de alto, las señales semafóricas e impedir que vehículos con otros movimientos obstruyan el campo de visión del momento de interés.
2. Establecer una línea de referencia en el pavimento, normalmente el paso peatonal o la línea de alto. Los automóviles deben parar habitualmente detrás de esta referencia. Se considera que el automóvil entra en la intersección cuando su eje trasero cruza dicha referencia.
3. Se inicia la aplicación del Estudio de Flujo de Saturación (Figura 7.1) y se llenan los campos requeridos.



The image shows the initial screen of the 'Saturation Flow Study' application. At the top, there is a black header with the app's name 'Saturation Flow Study' in white text. Below the header, there are three input fields: 'Study Name' with a placeholder 'An identifier for the study', 'Performed By', and 'Notes' with a placeholder 'Additional information for the study'. At the bottom of the screen is a grey button labeled 'Start Data Collection'.

Figura 7.1 Aplicación “Estudio de Flujo de Saturación” pantalla inicial.
Fuente: Saturation Flow Study app (2014)

4. Una vez realizado el paso anterior, se indica que se iniciará la recolección de datos (Start Data Collection).

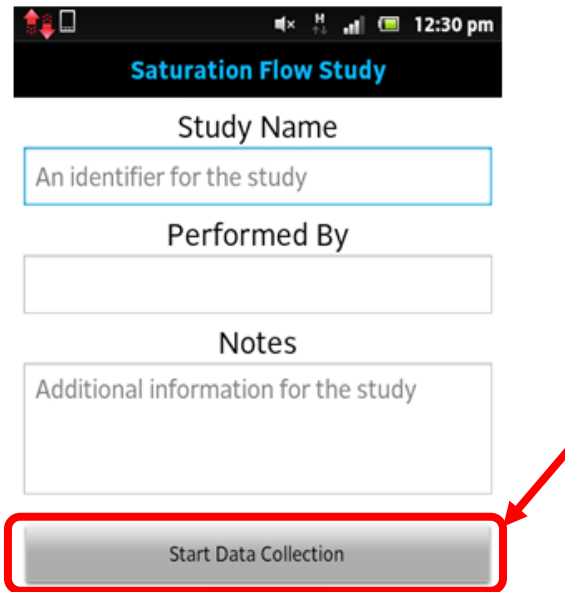


Figura 7.2 Aplicación “Estudio de Flujo de Saturación”, comienzo recolección de datos.
Fuente: Saturation Flow Study app (2014)

5. En cuanto comience la fase de verde del semáforo se empieza el ciclo en la aplicación (Start of Cycle) y se indica cada vehículo que atraviesa la línea de referencia con su eje trasero, indicando en su caso si se trata de un vehículo pesado, vehículo ligero o una motocicleta (en este estudio se descartaron las posibles bicicletas).

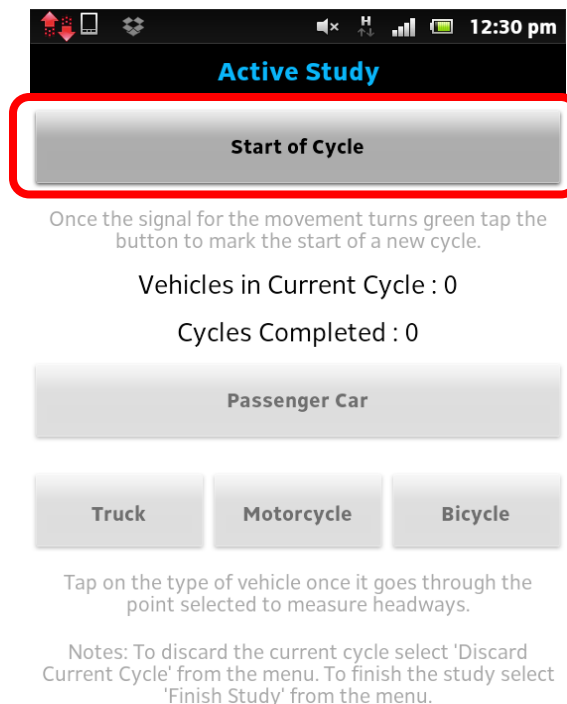


Figura 7.3 Aplicación “Estudio de Flujo de Saturación”, comienzo del ciclo.
Fuente: Saturation Flow Study app (2014)

6. Se dejan de contar los vehículos cuando atraviesa la línea de referencia el último vehículo que llegó a la fila justo antes que el semáforo cambiara su fase de rojo a verde, o en su caso cuando el semáforo cambie de verde a rojo si no han terminado de atravesar la línea de alto todos los vehículos que conforman la fila. No es necesario indicar en la aplicación ningún fin de ciclo, ya que éste está dado automáticamente con el último vehículo contabilizado. Mínimo debe haber 8 vehículos en la fila para que el ciclo sea válido.
7. Se debe realizar un estudio para cada ciclo. La pantalla indicará el número de ciclos que se han completado. Se repite el procedimiento a los ciclos que sean necesarios.

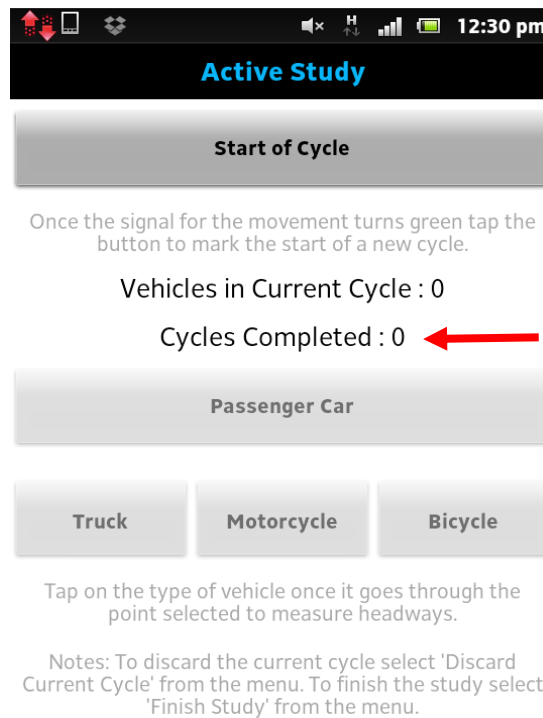


Figura 7.4 Aplicación “Estudio de Flujo de Saturación”, ciclos completados.

Fuente: Saturation Flow Study app (2014)

8. Una vez obtenidos los datos necesarios, se indica que el estudio ha llegado a su fin “Finish Study” y el dispositivo guarda toda la información que se requerirá en gabinete para obtener resultados. Si por algún motivo el ciclo actual no sirve, se descarta en “Discard Current Cycle”.

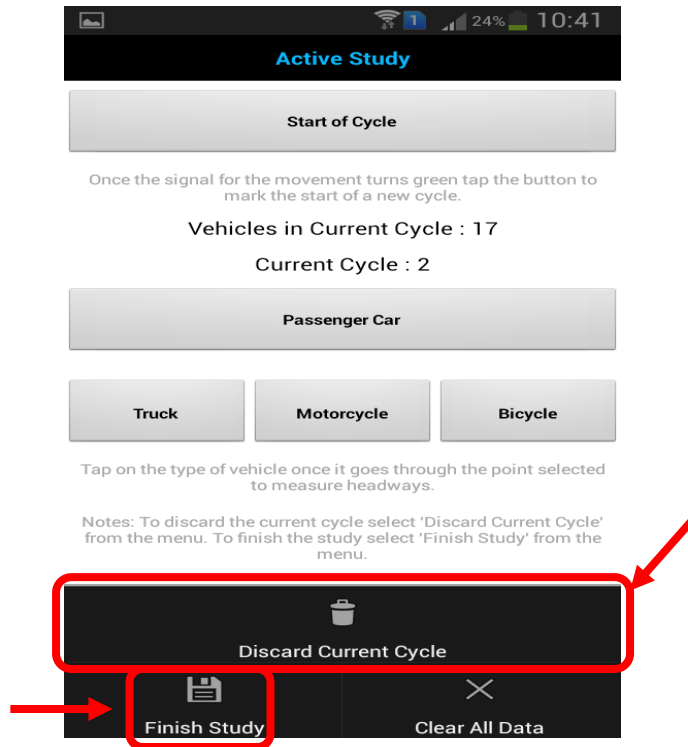


Figura 7.5 Aplicación “Estudio de Flujo de Saturación”, estudio terminado, ciclo descartado.
Fuente: Saturation Flow Study app (2014)

9. Estando ya en gabinete, para generar el archivo de datos en formato CSV, se inicia la aplicación en la pantalla principal y se selecciona la parte de estudios completados “Completed Studies”, estando ahí, se busca el estudio deseado y después se seleccionará “Export Data as CSV File” para exportar los datos como un archivo CSV. De esta manera es como se obtienen las hojas de cálculo de la aplicación para organizar los datos y obtener los flujos de saturación en Microsoft Office Excel.

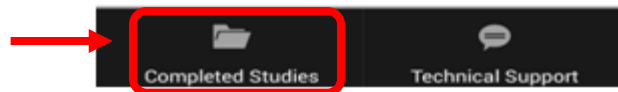
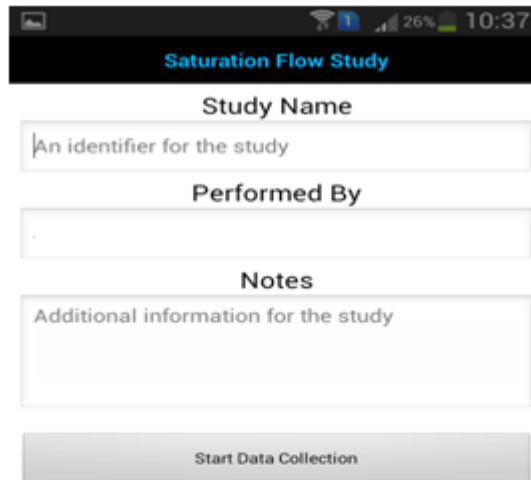


Figura 7.6 Aplicación “Estudio de Flujo de Saturación”, estudios completados.
Fuente: Saturation Flow Study app (2014)

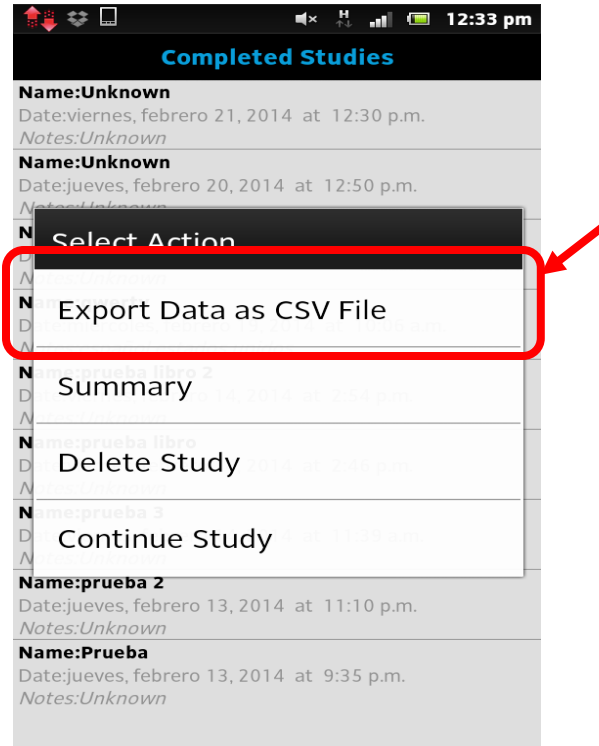


Figura 7.7 Aplicación “Estudio de Flujo de Saturación”, exportar datos CSV.
Fuente: Saturation Flow Study app (2014)

La tabla que arroja la aplicación es como el siguiente ejemplo:

Saturation Flow Study Data						
Name:	Av. Universidad, acceso Norte.					
Date:	Miércoles, marzo 19 2014 at 7:01 a.m.					
Performed by:	Matias Llanes					
Notes:	Unknown					
Eje 10 y Av. Universidad - Acceso Oriente, 7:00 hrs.						
Núm. Veh. \ Ciclo	Ciclo 1 (s)	Ciclo 2 (s)	Ciclo 3 (s)	Ciclo 4 (s)	Ciclo 5 (s)	Ciclo 6 (s)
1	3.11	1.83	3.86	2.6	2.29	3.22
2	2.62	3.64	1.39	2.13	2.06	3.01
3	1.85	1.88	1.84	1.86	2.39	2.41
4	2.46	1.61	1.95	1.72	3.65	1.97
5	2	1.85	1.94	2.71	1.79	1.24
6	1.39	3.09	3.27	1.92T	1.4	2.27
7	1.51	1.49	4.07	4.87	2.33	2.21
8	1.6	1.34	1.31	1.46	1.45	1.58
9	1.26	2.14	3.13T	1.49	2.84	1.14
10	1.97	1.68	2.46	2.87	1.92	1.35
11	1.74	2.16		1.57	1.15	1.33
12	2.44H					2.04
13	2.22					1.34
14	1.38					

Figura 7.8 Hoja de cálculo arrojada por la aplicación “Estudio de Flujo de Saturación”.
Fuente: Saturation Flow Study app (2014)

10. Para iniciar otro estudio sólo hay que retroceder hasta la pantalla principal para indicar el nombre, la localización o los datos pertinentes del nuevo estudio.
11. Con la hoja de cálculo arrojada por la aplicación móvil, se procede a determinar los flujos de saturación siguiendo la metodología del HCM 2000.

Se deben anotar todos aquellos sucesos especiales que puedan haber influido en el flujo de saturación, como son los autobuses, los vehículos que se paran por alguna razón, etc. para después descartar estos ciclos que podrían afectar los resultados. Las medidas se hacen en cada ciclo y cada carril.

Capítulo 8.
ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE SATURACIÓN
EN INTERSECCIONES SELECCIONADAS
EN LA CIUDAD DE MÉXICO

8. ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE SATURACIÓN EN INTERSECCIONES SELECCIONADAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

8.1 Descripción del estudio

La metodología a seguir en esta tesis para determinar el flujo de saturación base en la Ciudad de México será la metodología del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000). El flujo de saturación se emplea generalmente para caracterizar condiciones en que la demanda de tránsito está muy próxima a la capacidad de la vía, así es que debe medirse en las horas pico de días entre semana. Como las colas que se necesitan para la medición del flujo de saturación deben ser por lo menos de ocho vehículos, según el HCM 2000, se debe escoger un acceso a la intersección para el estudio en que las colas sean generalmente mayores de ocho vehículos.

Para obtener el aforo vehicular con los tiempos de cada vehículo se utilizará una aplicación para dispositivos móviles llamada “Saturation Flow Study” que está descrita en el capítulo anterior, y se tomarán en cuenta únicamente carriles con movimiento de frente. Posteriormente con los resultados obtenidos en campo se procederá a calcular los Flujos de Saturación siguiendo la metodología del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 200) aplicando tres variantes:

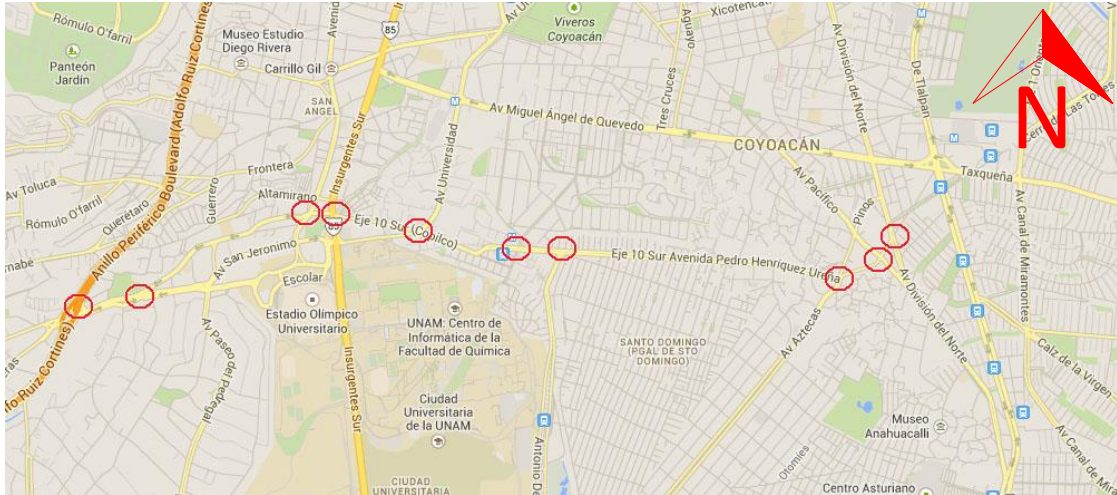
- *Variante 1:* Se toma en cuenta todo tipo vehículos que se formaron en la fila hasta que la luz del semáforo cambie a verde y alcancen a travesar la intersección, tomando camiones y motocicletas como un vehículo ligero.
- *Variante 2:* Se toma en cuenta sólo los 10 primeros vehículos formados en la fila que atraviesan la intersección y de igual manera que en la anterior, todos los vehículos se contemplan como ligeros.
- *Variante 3:* Se descartan los ciclos en los que se presentaban camiones y/o motocicletas, estudiando todos los vehículos que conformaron la fila antes que la luz del semáforo cambiara a verde y alcancen a atravesar la intersección en el ciclo.

-Selección de los sitios de estudio:

Los estudios para obtener el flujo de saturación base se realizaron en las intersecciones semaforizadas principales del eje 10 sur de la Ciudad de México, esta avenida es uno de los ejes viales más extensos de la Ciudad, así como de los más transitados. Su orientación es de Poniente a Oriente y viceversa.

Las intersecciones con el eje 10 sur estudiadas fueron las siguientes:

- Blvd. Adolfo Ruíz Cortines (Anillo Periférico).
- Avenida San Jerónimo.
- Avenida Revolución.
- Avenida de los Insurgentes Sur.
- Avenida Universidad.
- Cerro del agua.
- Antonio Delfín Madrigal.
- Avenida Aztecas.
- Avenida Pacífico.
- Avenida División del Norte.



Intersecciones estudiadas.

Figura 8.1 Corredor Eje 10 con intersecciones estudiadas.

Fuente: Google Maps (2014)

-Horarios y fechas de estudio:

Los aforos para estimar el flujo de saturación base en las intersecciones antes mencionadas se realizaron durante las horas pico del día, por la mañana de 7:00 a 9:00 horas, por la tarde de 14:00 a 16:00 horas y de 18:00 a 20:00 horas, hechos en días martes, miércoles o jueves. Estos horarios fueron seleccionados con la finalidad de obtener más vehículos haciendo fila en las intersecciones con semáforo para obtener los flujos de saturación más acertados, tal como lo sugiere la metodología del HCM 2000. Los aforos se llevaron a cabo durante el mes de abril y mayo de 2014.

8.2 Procedimiento de campo

El flujo de saturación base se mide registrando el tiempo y el número de vehículos que cruzan la línea de alto de los que conforman la fila cuando empieza la fase de verde. Se utiliza un punto del vehículo (eje trasero) para iniciar y detener el temporizador con el fin de no tener variaciones en la recolección de los datos. El tiempo se registra de nuevo cuando el cuarto y décimo vehículo cruza la línea de alto y hasta el último vehículo de la fila. Para este estudio se tomaron en cuenta únicamente carriles con movimiento de frente.

Para obtener los datos necesarios, se siguió la metodología descrita en el capítulo 7. A continuación se mostrará una descripción gráfica del procedimiento en campo para procesar posteriormente la información y obtener el flujo de saturación. En el siguiente subtema se procesará la información de campo y se mostrará la fórmula para determinar el flujo de saturación.

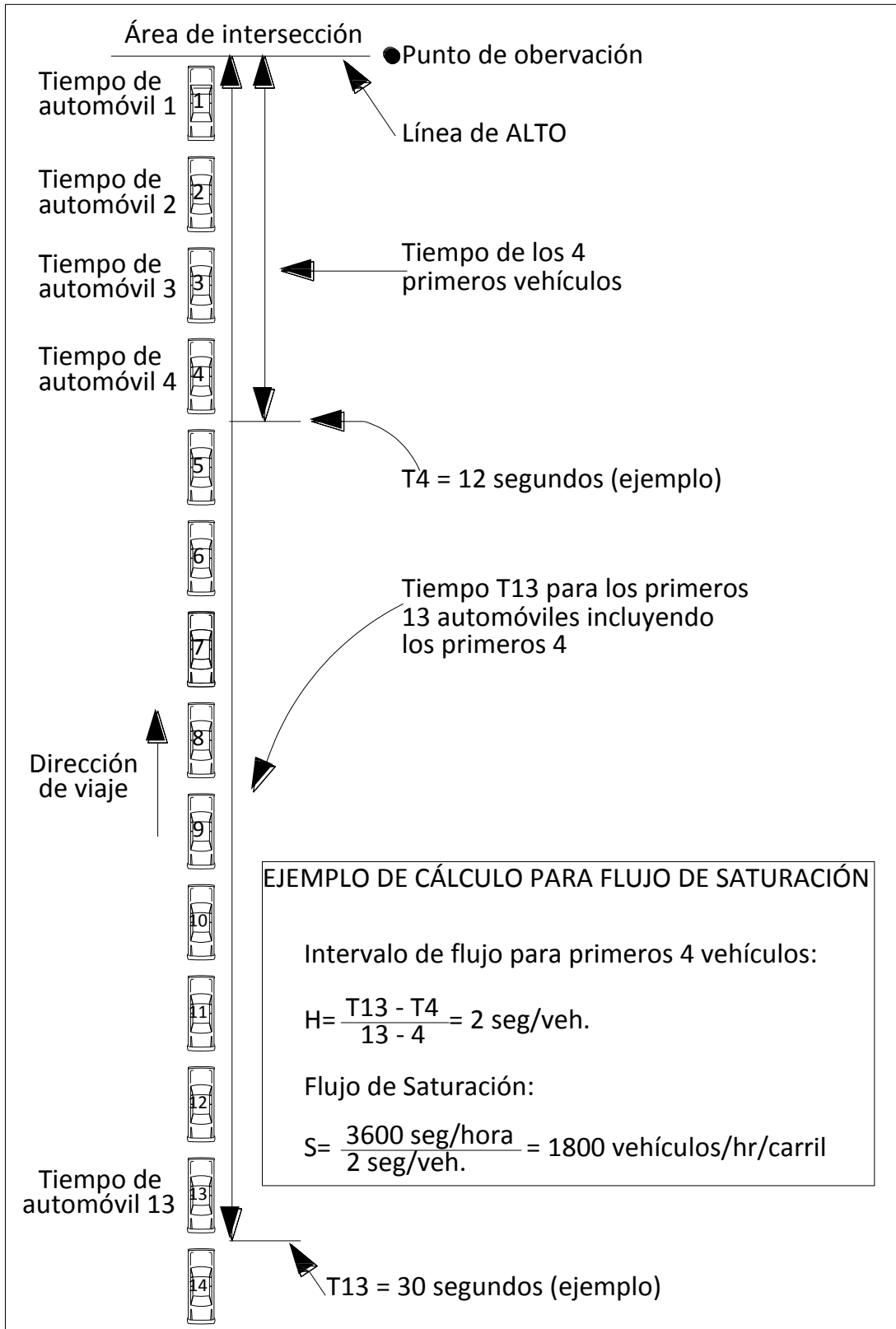


Figura 8.2 Medición del flujo de saturación en campo.
 Fuente: Transportation Engineering Basics. (Murthy, A.S. Narasimha, 2001)

8.3 Proceso de la información

Como se ha mencionado anteriormente, el período definido como flujo de saturación comienza cuando el eje trasero del cuarto vehículo de la fila cruza la línea de referencia, y termina cuando el último eje del último vehículo que estaba en la fila al comienzo de la luz verde cruza el mismo punto.

Para el cálculo del flujo de saturación base, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Flujo de saturación base} = \frac{3600}{(T_u - T_4)/(\#u - 4)} \quad (8.1)$$

Donde:

T_u = Tiempo del último vehículo

T_4 = Tiempo del cuarto vehículo

$\#u$ = Número del último vehículo

Para el proceso de los datos obtenidos en campo se utilizó el programa Microsoft Office Excel. A continuación se muestra una tabla de ejemplo de cómo se obtuvieron los resultados que se presentarán posteriormente. En el subtema anterior se muestra la descripción gráfica del procedimiento para obtener los resultados.

Tabla 8.1 Procedimiento para estimar el flujo de saturación

T4- Tiempo hasta el 4to vehículo (s)	10.16	12.95	16.72	8.34	10.7
Tu- Tiempo hasta el último vehículo (s)	25.17	26.22	30.36	29.82	40.19
Tu-T4 (s)	15.01	13.27	13.64	21.48	29.49
(#u-4) Número del último vehículo - 4	5	7	7	10	13
(Tu-T4)/(#u-4)	3.0020	1.8957	1.9486	2.1480	2.2685
PROMEDIO (Tu-T4)/(#u-4)	2.2525				
Flujo Saturación [3600/ (Tu-T4)/(#u-4)]	1598				

Fuente: Elaboración propia

Es decir, el flujo de saturación base del ejemplo anterior es 1598 vehículos/hora/carril.

8.4 Resultados obtenidos

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las intersecciones semaforizadas seleccionadas para estimar el flujo de saturación en tres horarios pico del día de la Ciudad de México, recordando que se hicieron únicamente en carriles con movimiento de frente, en cada aproximación y siguiendo las tres variantes mencionadas en la descripción del estudio, que son:

- *Variante 1:* Se toma en cuenta todo tipo de vehículos que se formaron en la fila hasta que la luz del semáforo cambie a verde y alcancen a travesar la intersección, tomando camiones y motocicletas como un vehículo ligero.
- *Variante 2:* Se toma en cuenta sólo los 10 primeros vehículos formados en la fila que atraviesan la intersección y de igual manera que en la anterior, todos los vehículos se contemplan como ligeros.

- *Variante 3*: Se descartan los ciclos en los que se presentaban camiones y/o motocicletas, estudiando todos los vehículos que conformaron la fila antes que la luz del semáforo cambiara a verde y alcancen a atravesar la intersección en el ciclo.

Se presentan los flujos de saturación obtenidos por acceso en los tres horarios del día estudiados por cada intersección. Posteriormente se presenta un promedio de los flujos de saturación obtenidos por variante, que representan el flujo de saturación base.

Todos los resultados se representan en vehículos por hora de verde por carril (vehículos/hora/carril). Están presentados en tablas de elaboración propia según resultados obtenidos.

8.4.1 Intersección: Eje 10 y Blvd. Adolfo Ruíz Cortines (Anillo Periférico)

La intersección del Blvd. Adolfo Ruíz Cortines y el Eje 10, es una intersección a desnivel, pues se compone también por el segundo piso del periférico, sin embargo, se estudiarán los accesos que interceptan las dos vialidades principales, se muestran en la figura siguiente y son el acceso Sur por Periférico, Oriente y Poniente por Eje 10.



Figura 8.3 Vista aérea, intersección Eje 10 con Blvd. Adolfo Ruiz Cortines.
Fuente: Google Maps (2014)

Eje 10 y Anillo Periférico - Acceso Sur (A)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1554	1466	1448
Variante 2	1632	1464	1457
Variante 3	1583	1419	1416

Eje 10 y Anillo Periférico- Acceso Oriente (B)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1675	1605	1567
Variante 2	1612	1475	1470
Variante 3	1675	1653	1619

Eje 10 y Anillo Periférico- Acceso Poniente (C)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1686	1664	1657
Variante 2	1705	1697	1647
Variante 3	1718	1629	1686



Figura 8.4 Intersección Eje 10 con Blvd. Adolfo Ruiz Cortines.
Fuente: Google Maps (2014)

8.4.2 Intersección: Eje 10 y Avenida San Jerónimo

Esta intersección va desde el distribuidor vial San Jerónimo hasta la Avenida Universidad pasando a un costado de la colonia Jardines del Pedregal con dirección Poniente-Oriente. Se compone de tres accesos, sin embargo, sólo se estudiará dos (Sur y Poniente), pues el acceso Oriente no acumuló filas para estimar un flujo de saturación.



Figura 8.5 Vista aérea, intersección Eje 10 con Av. San Jerónimo.
Fuente: Google Maps (2014)

Eje 10 y Av. San Jerónimo - Acceso Sur (A)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1733	1771	1815
Variante 2	1702	1757	1771
Variante 3	1733	1771	1815

Eje 10 y Av. San Jerónimo - Acceso Poniente (B)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1603	1544	1630
Variante 2	1648	1566	1691
Variante 3	1606	1694	1670



Figura 8.6 Intersección Eje 10 con Av. San Jerónimo.
Fuente: Google Maps (2014)

8.4.3 Intersección: Eje 10 y Avenida Revolución

Esta intersección está compuesta por tres accesos principales, el acceso Oriente por Eje 10 y accesos Norte y Sur por Avenida Revolución.



Figura 8.7 Vista aérea, intersección Eje 10 con Av. Revolución.
Fuente: Google Maps (2014)

Eje 10 y Av. Revolución - Acceso Norte (A)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1670	1530	1461
Variante 2	1596	1519	1401
Variante 3	1670	1640	1440

Eje 10 y Av. Revolución - Acceso Sur (B)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1738	1795	1211
Variante 2	1657	1670	1196
Variante 3	1738	1807	1174

Eje 10 y Av. Revolución - Acceso Oriente (C)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1898	1772	1888
Variante 2	1897	1618	1750
Variante 3	1809	1772	1823



Figura 8.8 Intersección Eje 10 con Av. Revolución.
Fuente: Google Maps (2014)

8.4.4 Intersección: Eje 10 y Avenida de los Insurgentes

La intersección está compuesta por tres accesos, Norte y Sur por Av. de los Insurgentes, Oriente por el Eje 10. Esta intersección a nivel, se puede observar comúnmente saturada durante las horas pico del día. La figura 8.9 muestra los accesos descritos.



Figura 8.9 Vista aérea, intersección Eje 10 con Av. de los Insurgentes.
Fuente: Google Maps (2014)

Eje 10 y Av. Insurgentes - Acceso Norte (A)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1671	1300	997
Variante 2	1623	1301	975
Variante 3	1671	1382	1372

Eje 10 y Av. Insurgentes - Acceso Sur (B)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1905	1199	1750
Variante 2	1875	1099	1814
Variante 3	1905	1199	1750

Eje 10 y Av. Insurgentes - Acceso Oriente (C)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1499	1550	1470
Variante 2	1432	1759	1546
Variante 3	1669	1571	1551

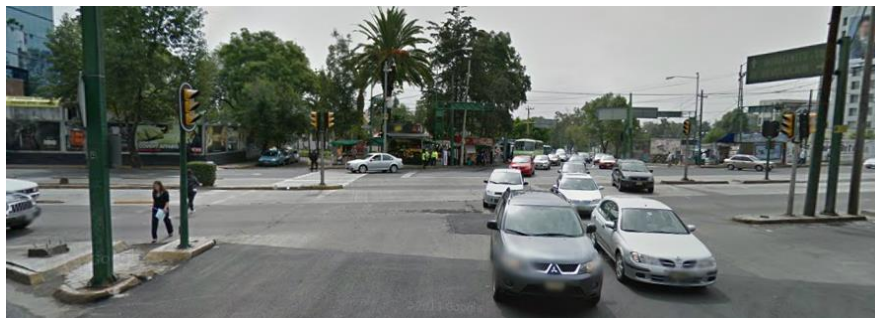


Figura 8.10 Intersección Eje 10 con Av. de los Insurgentes.
Fuente: Google Maps (2014)

8.4.5 Intersección: Eje 10 y Avenida Universidad

Esta intersección cuenta con tres accesos, el primero es el Poniente por Eje 10, los accesos Norte y Sur son por Avenida Universidad.



Figura 8.11 Vista aérea, intersección Eje 10 con Av. Universidad.
Fuente: Google Maps (2014)

Eje 10 y Av. Universidad - Acceso Norte (A)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	-	1511	-
Variante 2	-	1511	-
Variante 3	-	1511	-

Eje 10 y Av. Universidad - Acceso Sur (B)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1720	1465	1869
Variante 2	1743	1423	1869
Variante 3	1742	1351	1869

Eje 10 y Av. Universidad - Acceso Oriente (C)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1760	1706	1604
Variante 2	1744	1682	1585
Variante 3	1995	1934	1604



Figura 8.12 Intersección Eje 10 con Av. Universidad.
Fuente: Google Maps (2014)

8.4.6 Intersección: Eje 10 y Cerro del Agua

La intersección está compuesta por cuatro accesos, comienza en la zona de San Ángel en la Avenida de los Insurgentes Sur, cruzando Avenida Universidad y Metro Copilco cerca de Ciudad Universitaria, tiene dirección en ambos sentidos y termina en la calle de Cerro del agua e ingeniería. Los accesos Norte-Sur están en Cerro del Agua, y los accesos Oriente-Poniente por Eje 10.



Figura 8.13 Vista aérea, intersección Eje 10 con Cerro del Agua.
Fuente: Google Maps (2014)

Eje 10 y Cerro del Agua - Acceso Norte (A)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1444	1394	1292
Variante 2	1462	1436	1320
Variante 3	1566	1233	1225

Eje 10 y Cerro del Agua - Acceso Sur (B)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1475	1754	1820
Variante 2	1421	1716	1588
Variante 3	2197	1899	1740

Eje 10 y Cerro del Agua - Acceso Oriente (C)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1724	1716	1525
Variante 2	1898	1716	1594
Variante 3	1693	1689	1572

Eje 10 y Cerro del Agua - Acceso Poniente (D)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1504	1725	1447
Variante 2	1552	1717	1391
Variante 3	1523	1716	1335



Figura 8.14 Intersección Eje 10 con Cerro del Agua.
Fuente: Google Maps (2014)

8.4.7 Intersección: Eje 10 y Antonio Delfín Madrigal

Esta intersección está compuesta por tres accesos, el primero es el acceso Sur por Antonio Delfín Madrigal y los otros dos accesos Oriente-Poniente por Eje 10.



Figura 8.15 Vista aérea, intersección Eje 10 con Antonio Delfín Madrigal.
Fuente: Google Maps (2014)

Eje 10 y Delfín Madrigal - Acceso Sur (A)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1785	1810	-
Variante 2	1748	1810	-
Variante 3	1785	1810	-

Eje 10 y Delfín Madrigal - Acceso Oriente (B)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1910	-	-
Variante 2	1917	-	-
Variante 3	1910	-	-

Eje 10 y Delfín Madrigal - Acceso Poniente (C)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1883	1549	1758
Variante 2	1883	1555	1748
Variante 3	1892	1751	1758



Figura 8.16 Intersección Eje 10 con Antonio Delfín Madrigal.
Fuente: Google Maps (2014)

8.4.8 Intersección: Eje 10 y Avenida Aztecas

A partir de la calle Cerro de agua y del metro Copilco, este eje vial cambia su nombre por Pedro Enríquez Ureña, la avenida es más amplia y la divide un camellón para separar ambas direcciones, atraviesa la zona del Pedregal de Santo Domingo y finaliza en la avenida Aztecas, en donde termina la continuidad como eje 10 Sur. Se compone de los accesos Norte-Sur por Av. Aztecas y Poniente por Eje 10.



Figura 8.17 Vista aérea, intersección Eje 10 con Av. Aztecas.
Fuente: Google Maps (2014)

Eje 10 y Av. Aztecas - Acceso Norte (A)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1831	1668	1831
Variante 2	1848	1675	1787
Variante 3	1831	1726	1831

Eje 10 y Av. Aztecas - Acceso Sur (B)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1824	1728	1733
Variante 2	1824	1678	1724
Variante 3	1987	2207	1733

Eje 10 y Av. Aztecas - Acceso Poniente (C)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1559	1572	1757
Variante 2	1559	1572	1757
Variante 3	1559	1572	1757



Figura 8.18 Intersección Eje 10 con Av. Aztecas.
Fuente: Google Maps (2014)

8.4.9 Intersección: Eje 10 y Avenida Pacífico

Esta intersección está compuesta por tres accesos, Oriente-Poniente por Av. Pacífico y acceso Sur por la continuidad del Eje 10.



Figura 8.19 Vista aérea, intersección Eje 10 con Av. Pacífico.
Fuente: Google Maps (2014)

Eje 10 y Av. Pacífico - Acceso Sur (A)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1112	1052	1762
Variante 2	1099	1026	1902
Variante 3	1227	1099	1537

Eje 10 y Av. Pacífico - Acceso Oriente (B)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1415	1361	1749
Variante 2	1410	1352	1734
Variante 3	1404	1361	1749

Eje 10 y Av. Pacífico - Acceso Poniente (C)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1780	1503	1522
Variante 2	1780	1485	1522
Variante 3	1780	1692	1522



Figura 8.20 Intersección Eje 10 con Av. Pacífico.
Fuente: Google Maps (2014)

8.4.10 Intersección: Eje 10 y Avenida División del Norte

La intersección está compuesta por cuatro accesos, sin embargo, sólo se acumulan en dos de ellos filas de automóviles y es posible realizar el estudio de Flujo de saturación, en el acceso Sur por la Av. División del Norte, y el acceso Poniente por la continuación de Eje 10.



Figura 8.21 Vista aérea, intersección Eje 10 con Av. División del Norte.
Fuente: Google Maps (2014)

Eje 10 y Av. División del Norte - Acceso Sur (A)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1528	1952	-
Variante 2	1528	1952	-
Variante 3	1528	1952	-

Eje 10 y Av. División del Norte - Acceso Poniente (B)			
	7:00 - 9:00	14:00 - 16:00	19:00 - 21:00
Variante 1	1599	1203	1464
Variante 2	1540	1200	1458
Variante 3	1599	1664	1464



Figura 8.22 Intersección Eje 10 con Av. División del Norte.
Fuente: Google Maps (2014)

8.4.11 Resumen de los Flujos de Saturación obtenidos en las intersecciones seleccionadas

A continuación se muestra una tabla resumen de los Flujos de saturación base, obtenidos en las intersecciones semaforizadas seleccionadas:

Tabla 8.2 Resumen de flujos de saturación obtenidos

Intersección con Eje 10 Sur	Flujo de Saturación Base (Vehículos/hora/carril)		
	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Bld. Adolfo Ruiz Cortines	1592	1574	1600
Av. San Jerónimo	1683	1690	1715
Av. Revolución	1663	1590	1653
Av. de los Insurgentes	1483	1492	1564
Av. Universidad	1663	1651	1716
Cerro del Agua	1568	1592	1616
Antonio Delfín Madrigal	1783	1777	1818
Av. Aztecas	1723	1714	1801
Av. Pacífico	1473	1479	1486
Av. División del Norte	1550	1536	1642

Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos en las muestras de campo, se procede a sacar un promedio de los flujos de saturación de cada variante, así se determinara el flujo de saturación en intersecciones semaforizadas seleccionadas de la Ciudad de México.

Tabla 8.3 Resumen de flujos de saturación obtenidos en las tres variantes estudiadas

Flujo de Saturación Base (Vehículos/hora/carril)	Variante 1	Variante 2	Variante 3
		1610	1599

Fuente: Elaboración propia

Los tres resultados son válidos, según el criterio del lector. Como se ha mencionado en capítulos anteriores, estos tres resultados obtenidos representan el flujo de saturación base, es decir, este valor se ajusta a las condiciones prevalecientes, para obtener el flujo de saturación para el grupo de carriles que se está considerando. El ajuste se hace mediante la introducción de factores de corrección para el número de carriles, el ancho del carril, el porcentaje de vehículos pesados en el tránsito, la pendiente en el acceso, la actividad de estacionamiento, los autobuses locales que paran dentro de la intersección, el tipo de área, el factor de utilización de carriles, y las vueltas a la derecha y a la izquierda. Por lo tanto se recomienda utilizar el valor de la variante 3, pues es el que descarta los ciclos en donde participaron vehículos pesados, motocicletas y autobuses. Sin embargo, se observa que los resultados de las tres variantes son muy similares, y utilizar un flujo de saturación base entre 1600 y 1700 vehículos/hora/carril en la Ciudad de México arrojaría buenos resultados en cuanto a la revisión, construcción y modernización de las intersecciones.

8.5 Resultados estadísticos del Flujo de Saturación

A continuación se muestra una tabla con los resultados estadísticos de las muestras obtenidas en campo.

Tabla 8.4 Resultados estadísticos de las muestras obtenidas en campo

Flujo de Saturación	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Media	1610	1599	1651
Mediana	1657	1623	1675
Moda	1831	1716	1670
Mínimo	997	975	1099
Máximo	1952	1952	2207
Varianza	42197.24	44048.94	47073.89
Desviación estándar	204.24	209.88	216.97
Curtosis	0.56	0.7	0.44
Coeficiente de asimetría	-0.83	-0.83	-0.25

Fuente: Elaboración propia

8.6 Comparación del Flujo de Saturación de México con otros países

La tabla 8.4 muestra los con Flujos de Saturación obtenidos en estudios realizaos en distintos países.

Tabla 8.4 Comparación de flujos de saturación de distintos países y México

País	Flujo de Saturación (vehículos/hr/carril)
Australia	1710
Grecia	1972
Egipto	1617
Malasia	1945
Chile	1603
India	1232
Brasil	1660
China	1326
China	1465
E.U.A.	1900
Reino Unido	2080
Reino Unido	1778
Reino Unido	1691
Reino Unido	1575
México	1651

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla anterior, México se encuentra por encima de algunos países que han realizado este estudio, sin embargo también está por debajo de otros. Para establecer este valor interviene de manera importante el efecto de los vehículos pesados, el límite de velocidad, la presión del tránsito, población de la zona, y el número de carriles de las vialidades estudiadas. Es por eso que se debe someter a una serie de ajustes que recomienda el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000) pues estos estudios no garantizan que están realizados con las condiciones ideales que se establecen.

Capítulo 9.
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2000), con todos sus resultados y recomendaciones está basado, principalmente, en estudios que se han realizado en los Estados Unidos de América, éste se utiliza en nuestro país para calcular la capacidad de las vialidades, tanto para el diseño como para determinar la operación de la infraestructura vial; aunque, las condiciones que dominan en México no son las mismas que las de los Estados Unidos de América.

Los estudios locales de Ingeniería de Tránsito (incluido el de flujo de saturación), son necesarios para la planeación y modernización de vialidades e intersecciones en las distintas ciudades en donde el volumen vehicular es importante; gracias a ellos es posible determinar las condiciones de operación actuales y estimar las futuras, así como las características geométricas que han de utilizarse en las futuras vías a construir.

Esta investigación verifica y comprueba la hipótesis planteada al inicio, pero lo que es más importante, se obtuvo un valor de flujo de saturación representativo para las condiciones prevalecientes en México, adaptándose a la metodología del Manual de Capacidad de Carreteras; además, muestra información necesaria para realizar un análisis de capacidad en intersecciones semaforizadas.

Se espera que los resultados de este estudio puedan ser utilizados como base para futuros trabajos de investigación del sistema de tránsito vehicular en la Ciudad de México y en otras ciudades importantes del país.

En esta tesis se encontró que el de flujo de saturación en la Ciudad de México, es más alto que en otros países mostrados anteriormente. Esto podría ser debido a las velocidades con que transitan los conductores locales y también a las condiciones geométricas de las vialidades existentes, de la misma manera, en otros países el flujo de saturación es más alto que en México, por las mismas razones. Un aumento en el límite de velocidad conduce a un aumento en la tasa de flujo de saturación.

Las nuevas estimaciones del flujo de saturación desarrolladas en este estudio son más razonables y se sugieren para ser utilizadas en el control del tránsito vehicular de la Ciudad de México, pues están realizados bajo las condiciones locales, así como para el cálculo de la capacidad y niveles de servicio en intersecciones semaforizadas.

Los objetivos de esta investigación han quedado cumplidos al estimar el flujo de saturación base en las diez intersecciones semaforizadas seleccionadas de la Ciudad de México, habiéndolo encontrado mediante tres variantes, y siendo éstos de 1610, 1599 y 1651 vehículos/hora/carril, además este valor se encuentra más por encima que por debajo de muchos países con los que fue comparado, lo que es bueno, pues hay mayor movimiento, es decir, alcanzan a travesar las intersecciones durante la fase de verde gran número de vehículos, lo que disminuye las filas de automóviles en los semáforos.

Con la estimación representativa para México del flujo de saturación, será más fácil incrementar la información en que se sustente un criterio en toma de decisiones respecto de evaluación de proyectos, diseño de intersecciones a nivel y desnivel, justificación de colocación de semáforos y cálculo de tiempos.

Observando los datos obtenidos en este estudio, se identifica que el volumen vehicular es alto, por lo tanto, se podrían recomendar los siguientes aspectos:

- Calibración de semáforos respecto a las distintas horas pico del día.

- Buscar o construir rutas alternas en corredores en dónde la demanda supera a la oferta.
- Establecer paraderos para el transporte público y hacer que se respeten, en dónde aún no existen.
- Realizar estudios para obtener el flujo de saturación en las intersecciones más problemáticas de la ciudad, para tomarlos en cuenta en las futuras construcciones y modernizaciones de intersecciones en la Ciudad de México.
- Aplicar los factores de ajuste para los flujos de saturación base, medidos en campo, siguiendo la metodología del Manual de Capacidad de Carreteras, para que éstos sean ideales, a fin de obtener resultados más eficaces en los estudios de Ingeniería de Tránsito posteriores.

Las recomendaciones, con el fin de tener un Flujo de Saturación mayor, es decir, que más automóviles puedan atravesar las intersecciones durante las fases en verde de los semáforos, así se tendría mayor movimiento y disminuirían las filas de automóviles en las intersecciones, teniendo como resultado menores índices de contaminación y tener tiempos de recorrido menores. De esta manera mejoraría el Nivel de Servicio de las vialidades.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonzo Salomón, L. A., & Rodríguez Rufino, G. J. (2005). *Carreteras. Volumen 8*. Mérida, México: UADY.
- Bester, C. J., y Meyers, W.L. (2007). *Saturation Flow Rates*. Sudáfrica: Document Transformation Technologies cc.
- Cabrera Vega, F. I. (2010). *Efectos en las medidas de eficiencia al usar los valores por omisión, del HCM, en intersecciones semaforizadas*. Lisboa.
- Cal y Mayor R. Rafael y Cárdenas G., J. (2010). *Ingeniería de tránsito: Fundamentos y aplicaciones*. México: Alfaomega.
- Dunlap, B. M. (2005). *Field measurement of ideal saturation flow rate from the Highway Capacity Manual*. Morgantown, West Virginia.
- J. Garber Nicholas y Lester A. Hoel. (2005). *Ingeniería de tránsito y carreteras*. México: Thomson.
- Jawed Iqbal, M. (2009). *Estimation of saturation flow and lost time at selected signalized intersections of Karachi (Pakistan)*. Karachi.
- Morales Sosa, H.A. (2006). *Ingeniería vial I*. Santo Domingo: Instituto Tecnológico de Santo Domingo.
- Murthy, A. S. Narasimha, & Mohle, Henry R. (2001). *Transportation Engineering Basics*. Estados Unidos de América: American Society of Civil Engineers.
- Peng, Depin (2012). *The comparison Research of Capacity and Saturation Flow between China and UK*. Beijing, China: Asian Network for Scientific Information.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (1986). *Manual de Dispositivos para el Control del Tránsito en Calles y Carreteras*. Dirección General de Servicios Técnicos. México.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (1991). *Manual de proyecto Geométrico de Carreteras*. Dirección General de Servicios Técnicos. México.
- Transportation Research Board. (2000). *Highway Capacity Manual*. 2000. Washington D.C: TRB 2000.

ANEXOS. AFOROS VEHICULARES Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS.

Se mostrarán a continuación, un ejemplo de la tabla de aforos vehiculares y la obtención de resultados mediante las tres variantes utilizadas, para cada intersección estudiada.

-Aforos vehiculares y obtención de resultados de intersección Eje 10 y Periférico.

Eje 10 y Periférico - Acceso Oriente, 14:00 hrs.					
Núm. Veh. \ Ciclo	Ciclo 1 (s)	Ciclo 2 (s)	Ciclo 3 (s)	Ciclo 4 (s)	Ciclo 5 (s)
1	2.83	1.98	3.19	2.26	2.36
2	1.9	1.64	1.95	2.2	1.72
3	3.03	2.2	2.5	1.55	1.97
4	2.22	1.84	1.74	1.97	2.66
5	4.64	4.01	1.98	1.74	1.41
6	1.61	2.29	2.03	2.19	2.09
7	7.74T	1.46	1.93	2.15	2.34
8	1.46	2.9	3.37	1.98	2.36
9	1.73	2	2.38	2.51	2.07
10	1.78	3.57	1.46		1.85
11	2.03	2.32	2.36		0.99
12	1.05	2.2	2.05		2.73
13	1.26	2.13	2.09		
14	1.48	1.68			
15	2.81	1.94			
16		4.4			
17		1.42			
18		1.78			

Variante 1					
T4	9.98	7.66	9.38	7.98	8.71
Tu	37.57	41.76	29.03	18.55	24.55
Tu-T4	27.59	34.1	19.65	10.57	15.84
#u-4	11	14	9	5	8
(Tu-T4)/(#u-4)	2.5082	2.4357	2.1833	2.1140	1.9800
PROMEDIO	2.2442				
Flujo Saturación	1605				

Variante 2					
T4	9.98	7.66	9.38	7.98	8.71
Tu	28.94	23.89	22.53	18.55	20.83

Tu-T4	18.96	16.23	13.15	10.57	12.12
#u-4	6	6	6	5	6
(Tu-T4)/(#u-4)	3.1600	2.7050	2.1917	2.1140	2.0200
PROMEDIO	2.4381				
Flujo Saturación	1477				

Variante 3					
T4	7.66	9.38	7.98	8.71	
Tu	41.76	29.03	18.55	24.55	
Tu-T4	34.1	19.65	10.57	15.84	
#u-4	14	9	5	8	
(Tu-T4)/(#u-4)	2.4357	2.1833	2.1140	1.9800	
PROMEDIO	2.1783				
Flujo Saturación	1653				

-Aforos vehiculares y obtención de resultados de intersección Eje 10 y Av. San Jerónimo.

Eje 10 y Av. San Jerónimo - Acceso Poniente, 7:00 hrs.					
Núm. Veh. \ Ciclo	Ciclo 1 (s)	Ciclo 2 (s)	Ciclo 3 (s)	Ciclo 4 (s)	Ciclo 5 (s)
1	2	2.08	1.96	2.17	1.99
2	2.37	1.23	1.99	2.33	2.46
3	1.63	1.8	2.94	1.73	1.77
4	3.39	1.94	2.41	2.3	2.25
5	2.7	2.04	1.64	2.27	1.28
6	2.76	1.78	2.59	1.17	1.51
7	1.6	2.44	1.39	1.79	1.61
8	2.71	1.59	2.78	1.69	3.21
9	2.88	4.50T	1.83	1.74	1.67
10	2.21		2.3	4.21T	1.18
11	3		1.29	1.82	3.88
12	1.95			1.49	
13	2.57			2.11	
14	4.17			2.19	
15	2.29			1.96	
16	1.8				
17	4.5				

Variante 1					
T4	9.39	7.05	9.3	8.53	8.47
Tu	44.53	19.4	23.12	30.97	22.81

Tu-T4	35.14	12.35	13.82	22.44	14.34
#u-4	13	5	7	11	7
(Tu-T4)/(#u-4)	2.7031	2.4700	1.9743	2.0400	2.0486
PROMEDIO	2.2472				
Flujo Saturación	1603				

Variante 2					
T4	9.39	7.05	9.3	8.53	8.47
Tu	24.25	19.4	21.83	21.4	18.93
Tu-T4	14.86	12.35	12.53	12.87	10.46
#u-4	6	5	6	6	6
(Tu-T4)/(#u-4)	2.4767	2.4700	2.0883	2.1450	1.7433
PROMEDIO	2.1847				
Flujo Saturación	1648				

Variante 3					
T4	9.39		9.3		8.47
Tu	44.53		23.12		22.81
Tu-T4	35.14		13.82		14.34
#u-4	13		7		7
(Tu-T4)/(#u-4)	2.7031		1.9743		2.0486
PROMEDIO	2.2420				
Flujo Saturación	1606				

-Aforos vehiculares y obtención de resultados de intersección Eje 10 y Av. Revolución.

Eje 10 y Av. Revolución - Acceso Norte, 7:00 hrs.					
Núm. Veh. \ Ciclo	Ciclo 1 (s)	Ciclo 2 (s)	Ciclo 3 (s)	Ciclo 4 (s)	Ciclo 5 (s)
1	2.05	3.45	2.33	1.23	0.89
2	3.3	1.78	2.01	1.52	2.38
3	2.82	2.16	3.87	1.64	1.4
4	3.87	1.64	2.87	2.11	1.58
5	2.91	3.54	1.88	2.45	1.84
6	3.48	2.55	1.72	2.21	1.51
7	2.11	1.75	2.65	2.7	2.31
8	2.04	1.75	1.93	1.6	1.86
9	3.69	1.6	1.6	2.66	
10	1.99	2.02	4.19	1.41	
11	3.26		2.97	1.52	
12	3.44		1.9	2.09	

13	2.3		2.08	1.56	
14	2.04		1.96	1.77	
15	2.28		1.88		
16	2.02		1.94		
17			2.35		
18			1.39		
19			1.51		
20			1.66		
21			1.58		

Variante 1					
T4	12.04	9.03	11.08	6.5	6.25
Tu	43.6	22.24	46.27	26.47	13.77
Tu-T4	31.56	13.21	35.19	19.97	7.52
#u-4	12	6	17	10	4
(Tu-T4)/(#u-4)	2.6300	2.2017	2.0700	1.9970	1.8800
PROMEDIO	2.1557				
Flujo Saturación	1670				

Variante 2					
T4	12.04	9.03	11.08	6.5	6.25
Tu	28.26	22.24	25.05	19.53	13.77
Tu-T4	16.22	13.21	13.97	13.03	7.52
#u-4	6	6	6	6	4
(Tu-T4)/(#u-4)	2.7033	2.2017	2.3283	2.1717	1.8800
PROMEDIO	2.2570				
Flujo Saturación	1596				

Variante 3					
T4	12.04	9.03	11.08	6.5	6.25
Tu	43.6	22.24	46.27	26.47	13.77
Tu-T4	31.56	13.21	35.19	19.97	7.52
#u-4	12	6	17	10	4
(Tu-T4)/(#u-4)	2.6300	2.2017	2.0700	1.9970	1.8800
PROMEDIO	2.1557				
Flujo Saturación	1670				

-Aforos vehiculares y obtención de resultados de intersección Eje 10 y Av. de los Insurgentes.

Eje 10 y Av. Insurgentes - Acceso Sur, 7:00 hrs.					
Núm. Veh. \ Ciclo	Ciclo 1 (s)	Ciclo 2 (s)	Ciclo 3 (s)	Ciclo 4 (s)	Ciclo 5 (s)
1	5.55	2.98	3.14	1.63	1.46
2	1.63	2.2	2.94	1.7	2.09
3	3.75	1.7	2.91	2.15	1.8
4	3.18	1.56	1.4	1.53	1.94
5	2.67	1.48	1.03	2.36	1.97
6	1.85	1.53	2.15	1.3	3.64
7	1.51	1.38	1.94	2.07	2.54
8	1.48	1.34	1.75	2.08	1.89
9	1.32	2.04	1.4	2.09	1.48
10	2.22	1.81	1.48	3.84	1.98
11	1.84	1.46	1.7	1.7	2.15
12	1.32	1.28	3.96	1.61	2.06
13	1.68	2.14	1.12	3	1.8
14	2.99	1.27	1.76	2.36	1.68
15	1.72	1.62	1.65	1.5	1.62
16	1.49	2.25	1.42	1.6	1.66
17	2.18	1.56	1.64		2.45
18	2.02	1.58	1.77		
19	1.56	1.26	2.04		
20	1.37	1.82			
21	2.94				
22	1.44				
23	1.62				
24	1.84				

Variante 1					
T4	14.11	8.44	10.39	7.01	7.29
Tu	51.17	34.26	37.2	32.52	34.21
Tu-T4	37.06	25.82	26.81	25.51	26.92
#u-4	20	16	15	12	13
(Tu-T4)/(#u-4)	1.8530	1.6138	1.7873	2.1258	2.0708
PROMEDIO	1.8901				
Flujo Saturación	1905				

Variante 2					
T4	14.11	8.44	10.39	7.01	7.29
Tu	25.16	18.02	20.14	20.75	20.79
Tu-T4	11.05	9.58	9.75	13.74	13.5

#u-4	6	6	6	6	6
(Tu-T4)/(#u-4)	1.8417	1.5967	1.6250	2.2900	2.2500
PROMEDIO	1.9207				
Flujo Saturación	1875				

Variante 3					
T4	14.11	8.44	10.39	7.01	7.29
Tu	51.17	34.26	37.2	32.52	34.21
Tu-T4	37.06	25.82	26.81	25.51	26.92
#u-4	20	16	15	12	13
(Tu-T4)/(#u-4)	1.8530	1.6138	1.7873	2.1258	2.0708
PROMEDIO	1.8901				
Flujo Saturación	1905				

-Aforos vehiculares y obtención de resultados de intersección Eje 10 y Av. Universidad.

Eje 10 y Av. Universidad - Acceso Oriente, 14:00 hrs.						
Núm. Veh. \ Ciclo	Ciclo 1 (s)	Ciclo 2 (s)	Ciclo 3 (s)	Ciclo 4 (s)	Ciclo 5 (s)	Ciclo 6 (s)
1	4.22	1.66	2.39	3.51	2.53	3.61
2	1.63	2.7	4.05	2.76	4.44	3.22
3	1.85	3.26	3.41	7.47	2.05	2.29
4	1.92	1.76	3.17	1.94	3.15	2.36
5	1.24	2.26	2.58	1.29	1.87	1.93
6	3.34	1.39	2.32	1.46	2.39	1.9
7	1.49	1.78	4.82	1.08	3.06	1.09
8	3.66	2.36	11.12	2.51	3.52	1.75
9	4.27	1.95	2.01	1.71	3.96	1.57
10	2.51H	1.39	2.38	2.75	1.73	2.69
11	1.19	1.68H		2.29	2.46	1.46
12	2.01	0.80H		2.49	2.1	1.49
13	1.75			2.14	1.65	1.33
14				2.97	1.7	1.55
15				3.47	2.46	3.97
16				3.35	2.12	1.35
17				2.05	2.3	
18				2.3	1.89	
19				2.12		
20				2.26		
21				2.36		
22				1.78		

Variante 1						
T4	9.62	9.38	13.02	15.68	12.17	11.48
Tu	31.08	22.99	38.25	56.06	45.38	33.56
Tu-T4	21.46	13.61	25.23	40.38	33.21	22.08
#u-4	9	8	6	18	14	12
(Tu-T4)/(#u-4)	2.3844	1.7013	4.2050	2.2433	2.3721	1.8400
PROMEDIO	2.4577					
Flujo Saturación	1465					

Variante 2						
T4	9.62	9.38	13.02	15.68	12.17	11.48
Tu	26.13	20.51	38.25	26.48	28.7	22.41
Tu-T4	16.51	11.13	25.23	10.8	16.53	10.93
#u-4	6	6	6	6	6	6
(Tu-T4)/(#u-4)	2.7517	1.8550	4.2050	1.8000	2.7550	1.8217
PROMEDIO	2.5314					
Flujo Saturación	1423					

Variante 3						
T4			13.02	15.68	12.17	11.48
Tu			38.25	56.06	45.38	33.56
Tu-T4			25.23	40.38	33.21	22.08
#u-4			6	18	14	12
(Tu-T4)/(#u-4)			4.2050	2.2433	2.3721	1.8400
PROMEDIO	2.6651					
Flujo Saturación	1351					

-Aforos vehiculares y obtención de resultados de intersección Eje 10 y Cerro del Agua.

Eje 10 y Cerro del Agua - Acceso Sur, 14:00 hrs.						
Núm. Veh. \ Ciclo	Ciclo 1 (s)	Ciclo 2 (s)	Ciclo 3 (s)	Ciclo 4 (s)	Ciclo 5 (s)	Ciclo 6 (s)
1	3.79	2.61	1.5	5.11	2.77	2.87
2	2.03	2.11	3.38	2.43	1.92	1.36
3	1.96	2.85	2.18	2.21	2.7	2
4	4.32T	1.92	1.7	1.43	1.54	2.08
5	5.57	1.86	2.82	1.78	1.43	1.57
6	2.35	1.52	1.49	1.64	3.81	1.28
7	3.81	1.72	1.59	1.56	2.05	1.47
8	3.8	1.49	2.3	2.06	1.93	3.25
9	1.7	1.85H	1.7	2.66	1.59	1.84

10	1.28	0.62	1.8	1.38	3.36	1.63
11	3.02	1.21	2.26	1.75	1.18	1.44
12	2.71	0.99	2.38	1.43	1.45	1.27
13		2.47	1.51	2.38	1.38	1.87
14		3.41	1.41	1.84	2.34	1.85
15		1.81	2.7	1.59	1.52	1.7
16		1.5				1.69
17						2.01

Variante 1						
T4	12.1	9.49	8.76	11.18	8.93	8.31
Tu	36.34	29.94	30.72	31.25	30.97	31.18
Tu-T4	24.24	20.45	21.96	20.07	22.04	22.87
#u-4	8	12	11	11	11	13
(Tu-T4)/(#u-4)	3.0300	1.7042	1.9964	1.8245	2.0036	1.7592
PROMEDIO	2.0530					
Flujo Saturación	1754					

Variante 2						
T4	12.1	9.49	8.76	11.18	8.93	8.31
Tu	30.61	18.55	20.46	22.26	23.1	19.35
Tu-T4	18.51	9.06	11.7	11.08	14.17	11.04
#u-4	6	6	6	6	6	6
(Tu-T4)/(#u-4)	3.0850	1.5100	1.9500	1.8467	2.3617	1.8400
PROMEDIO	2.0989					
Flujo Saturación	1716					

Variante 3						
T4			8.76	11.18	8.93	8.31
Tu			30.72	31.25	30.97	31.18
Tu-T4			21.96	20.07	22.04	22.87
#u-4			11	11	11	13
(Tu-T4)/(#u-4)			1.9964	1.8245	2.0036	1.7592
PROMEDIO	1.8959					
Flujo Saturación	1899					

-Aforos vehiculares y obtención de resultados de intersección Eje 10 y Antonio Delfín Madrigal.

Eje 10 y Delfín Madrigal - Acceso Poniente, 18:00 hrs.					
Núm. Veh. \ Ciclo	Ciclo 1 (s)	Ciclo 2 (s)	Ciclo 3 (s)	Ciclo 4 (s)	Ciclo 5 (s)
1	1.48	2.94	2.96	2.82	2.89
2	1.92	1.53	2.33	4.61	2.51
3	3.58	2.47	1.85	2.09	1.84
4	1.89	2.58	1.98	1.58	2.44
5	2.34	2.43	2.34	1.41	1.72
6	1.8	2.48	1.64	1.28	1.19
7	1.86	2.02	2.61	3.15	3.29
8	2.1	2.08	1.61	2.56	2.5
9				1.44	2.19
10				1.21	1.9
11				1.41	

Variante 1					
T4	8.87	9.52	9.12	11.1	9.68
Tu	16.97	18.53	17.32	23.56	22.47
Tu-T4	8.1	9.01	8.2	12.46	12.79
#u-4	4	4	4	7	6
(Tu-T4)/(#u-4)	2.0250	2.2525	2.0500	1.7800	2.1317
PROMEDIO	2.0478				
Flujo Saturación	1758				

Variante 2					
T4	8.87	9.52	9.12	11.1	9.68
Tu	16.97	18.53	17.32	22.15	22.47
Tu-T4	8.1	9.01	8.2	11.05	12.79
#u-4	4	4	4	6	6
(Tu-T4)/(#u-4)	2.0250	2.2525	2.0500	1.8417	2.1317
PROMEDIO	2.0602				
Flujo Saturación	1748				

Variante 3					
T4	8.87	9.52	9.12	11.1	9.68
Tu	16.97	18.53	17.32	23.56	22.47
Tu-T4	8.1	9.01	8.2	12.46	12.79
#u-4	4	4	4	7	6
(Tu-T4)/(#u-4)	2.0250	2.2525	2.0500	1.7800	2.1317
PROMEDIO	2.0478				

Flujo Saturación	1758
------------------	-------------

-Aforos vehiculares y obtención de resultados de intersección Eje 10 y Av. Aztecas.

Eje 10 y Av. Aztecas - Acceso Sur, 14:00 hrs.					
Núm. Veh. \ Ciclo	Ciclo 1 (s)	Ciclo 2 (s)	Ciclo 3 (s)	Ciclo 4 (s)	Ciclo 5 (s)
1	1.86	1.65	1.66	2.92	2.07
2	5.68T	2.83	4.42	3.56	2.48
3	5.1	2.36	1.86	2.69	1.44
4	2.02	2.88T	1.24	2.32	3
5	2.19T	3.46T	1.42	4.44T	3.19
6	3.44	1.85	1.8	1.56	1.95
7	2.8	1.44	1.72	1.56	1.43
8	1.75H	2.44	1.12	1.11	7.79
9	2.14	1.32	1.4	1.4	2.44
10	1.24	1.56	1.51	1.26	1.68
11	1.73	1.55	2.68	2.31	1.98T
12	1.5	1.57	1.4	1.32	2.94T
13	1.88			2.44	
14	1.66				

Variante 1					
T4	14.66	9.72	9.18	11.49	8.99
Tu	34.99	24.91	22.23	28.89	32.39
Tu-T4	20.33	15.19	13.05	17.4	23.4
#u-4	10	8	8	9	8
(Tu-T4)/(#u-4)	2.0330	1.8988	1.6313	1.9333	2.9250
PROMEDIO	2.0843				
Flujo Saturación	1728				

Variante 2					
T4	14.66	9.72	9.18	11.49	8.99
Tu	28.22	21.79	18.15	22.82	27.47
Tu-T4	13.56	12.07	8.97	11.33	18.48
#u-4	6	6	6	6	6
(Tu-T4)/(#u-4)	2.2600	2.0117	1.4950	1.8883	3.0800
PROMEDIO	2.1470				
Flujo Saturación	1677				

Variante 3					
T4			9.18		

Tu		22.23
Tu-T4		13.05
#u-4		8
(Tu-T4)/(#u-4)		1.6313
PROMEDIO	1.6313	
Flujo Saturación	2207	

-Aforos vehiculares y obtención de resultados de intersección Eje 10 y Av. Pacífico.

Eje 10 y Av. Pacifico - Acceso Sur, 18:00 hrs.					
Núm. Veh. \ Ciclo	Ciclo 1 (s)	Ciclo 2 (s)	Ciclo 3 (s)	Ciclo 4 (s)	Ciclo 5 (s)
1	4.26	0.81	3.24	3.13	2.49
2	2.21	3.27T	2.52	2.04	5.70T
3	2.78	2.68	2.61	2.63	3.03
4	2.23	2.16	2.32	1.54	2.21
5	2.1	2.76	1.71	1.98	1.28
6	1.73	3.95	3.16	2.02	2.49
7	3.07T	2.1	2.21	2	1.78
8	1.28	2.11	1.51	1.7	2.73
9	1.89	1.88	2.22	4.54	1.46
10	2.5	1.92	1.7	2.06	1.93
11	1.32	1.61	2.44	2.3	2.47
12	1.94	1.98	3.73	2.12	2.29
13	2.44	2.36	1.79	2.2	2.87
14	2.16		1.61	3.85	
15	2.53T		1.6	3.09	
16			2.37		
17			1.6		
18			2.49		

Variante 1					
T4	11.48	8.92	10.69	9.34	13.43
Tu	34.44	26.32	40.83	37.2	27.03
Tu-T4	22.96	17.4	30.14	27.86	13.6
#u-4	11	9	14	11	9
(Tu-T4)/(#u-4)	2.0873	1.9333	2.1529	2.5327	1.5111
PROMEDIO	2.0435				
Flujo Saturación	1762				

Variante 2					
T4	11.48	8.92	10.69	9.34	13.43
Tu	24.05	20.37	23.2	23.64	19.4
Tu-T4	12.57	11.45	12.51	14.3	5.97
#u-4	6	6	6	6	6
(Tu-T4)/(#u-4)	2.0950	1.9083	2.0850	2.3833	0.9950
PROMEDIO	1.8933				
Flujo Saturación	1902				

Variante 3					
T4			10.69	9.34	
Tu			40.83	37.2	
Tu-T4			30.14	27.86	
#u-4			14	11	
(Tu-T4)/(#u-4)			2.1529	2.5327	
PROMEDIO	2.3428				
Flujo Saturación	1537				

-Aforos vehiculares y obtención de resultados de intersección Eje 10 y Av. División del Norte.

Eje 10 y Av. División del Norte - Acceso Poniente, 7:00 hrs.					
Núm. Veh. \ Ciclo	Ciclo 1 (s)	Ciclo 2 (s)	Ciclo 3 (s)	Ciclo 4 (s)	Ciclo 5 (s)
1	3.56	3.26	1.99	2.86	3.11
2	2.94	3.4	3.24	1.9	2.74
3	1.92	3.68	9.08	1.72	2.99
4	1.74	2.61	2.41	1.86	1.86
5	3.26	2.49	3.17	1.56	2.07
6	1.97	2.07	2.28	2.04	1.9
7	1.56	1.82	1.57	1.73	1.78
8	5.5	2.82	1.88	1.89	2.76
9	2.72	2.46	1.8	3.89	2.62
10		1.61	1.49	1.73	2.71
11			1.45	2.41	2.38
12				2.11	1.69
13				2.17	2.26
14				1.95	1.97
15					2.15
16					2.6
17					2.6

Variante 1					
T4	10.16	12.95	16.72	8.34	10.7
Tu	25.17	26.22	30.36	29.82	40.19
Tu-T4	15.01	13.27	13.64	21.48	29.49
#u-4	5	7	7	10	13
(Tu-T4)/(#u-4)	3.0020	1.8957	1.9486	2.1480	2.2685
PROMEDIO	2.2525				
Flujo Saturación	1599				

Variante 2					
T4	10.16	12.95	16.72	8.34	10.7
Tu	25.17	26.22	28.91	21.18	24.54
Tu-T4	15.01	13.27	12.19	12.84	13.84
#u-4	5	6	6	6	6
(Tu-T4)/(#u-4)	3.0020	2.2117	2.0317	2.1400	2.3067
PROMEDIO	2.3384				
Flujo Saturación	1540				

Variante 3					
T4	10.16	12.95	16.72	8.34	10.7
Tu	25.17	26.22	30.36	29.82	40.19
Tu-T4	15.01	13.27	13.64	21.48	29.49
#u-4	5	7	7	10	13
(Tu-T4)/(#u-4)	3.0020	1.8957	1.9486	2.1480	2.2685
PROMEDIO	2.2525				
Flujo Saturación	1599				